

Niko Haiko

Aurinkoinverterin modifiointi opetuskäyttöön

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkötekniikka

Insinöörityö

3.1.2014

Tekijä Otsikko	Niko Haiko Aurinkoinverterin modifiointi opetuskäyttöön
Sivumäärä Aika	35 sivua + 1 liite 3.1.2014
Tutkinto	insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	sähkötekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	sähkövoimatekniikka
Ohjaaja	lehtori Eero Kupila
<p>Tämä insinöörityö tehtiin Metropolia Ammattikorkeakoululle. Työn tavoitteena oli tutkia, onko ABB:n PVS300-aurinkoinverteristä mahdollista modifioida opetuskäyttöön soveltuva opetuslaite ja laboratoriotyö. Työ tuli aiheelliseksi, kun Metropolia Ammattikorkeakoulun Albertinkatu 40 - 42:n sähkökonelaboratorioon suunniteltiin uusia laitehankintoja.</p> <p>Työssä perehdyttiin hyvän laboratoriotyön vaatimuksiin haastatteleamalla Metropolia Ammattikorkeaa koulun opettajaa. PVS300-aurinkoinverterin mittaushaastatteluita selvitettiin pitämällä palavereja ABB:n suunnitteluinsinöörin ja suunnittelupäällikön kanssa. Heiltä saatiin myös testilaitteeksi PVS300-aurinkoinverteri, jota päästiin tutkimaan koulun sähkökonelaboratoriossa. Työssä aurinkoinverterille suunniteltiin ja toteutettiin mittaussytkentä sähkökonelaboratorion laitteita hyväksikäyttäen. Mittauskytkennällä suoritettiin mittauksia, joita mahdollisessa laboratoriotyössä tehtäisiin. Lisäksi työssä mietittiin hieman aurinkoinverterin asennusmahdollisuuksia.</p> <p>Tehdyn tutkimuksen perusteella voidaan todeta, että tutkimuksen mukaisilla mittauksilla, ja koulusta jo löytyvillä laboratoriolaitteilla aurinkoinverteristä ei saada riittävän laajaa laboratoriotyötä. Lisäksi koulun laboratoriolaitteilla ei pystytä simuloimaan aurinkopaneeleita riittävän hyvin. Joidenkin lisähankintojen avulla on kuitenkin mahdollista, että aurinkoinverteristä voidaan kehittää opetuskäyttöön soveltuva laboratoriotyö. Opetuslaitteeksi se soveltuu, joka tapauksessa mainiosti. Onhan aurinkoinverteri nykYTEKNIikkaa sekä todella ajan-kohtainen ja mielenkiintoinen laite.</p>	
Avainsanat	invertteri, aurinkoinvertteri

Author Title	Niko Haiko Modification of Solar Inverter for Teaching Purposes
Number of Pages Date	35 pages + 1 appendices 3 January 2014
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Electrical Engineering
Specialisation option	Electrical Power Engineering
Instructor	Eero Kupila, Senior Lecturer
<p>This Bachelor's thesis was carried out for Metropolia University of Applied Sciences. The goal of this project was to study the possibility to modify ABB's PVS300 solar inverter for teaching purposes. This was necessary, because Metropolia is planning to get new devices to the campus on Albertinkatu.</p> <p>During this project ABB's design engineer and verification manager were met with and a PVS300 solar inverter which could be used in measurements was provided by them. In these meetings the measurement possibilities of the PVS300 solar inverter were discussed. In this project measuring connections were planned and executed using devices from the school's laboratory. The measurements that were executed could also be done as laboratory work. Requirements for a good laboratory work were also included in this project by interviewing a teacher of Metropolia.</p> <p>This study shows that with these measurements and the school's laboratory devices the solar inverter is not suitable for laboratory work. Currently the laboratory work would not be extensive enough. However, with some new devices the laboratory work could be extended to meet the school's demands. After all solar inverter is modern technology and an interesting, topical device.</p>	
Keywords	inverter, solar inverter

Sisällys

Tiivistelmä

Abstract

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Aurinkosähköjärjestelmät	2
2.1	Omavarainen aurinkosähköjärjestelmä	2
2.2	Verkkoon kytketty aurinkosähköjärjestelmä	4
2.3	Aurinkosähköjärjestelmän komponentit	5
2.3.1	Aurinkokenno	5
2.3.2	Lataussäädin	7
2.3.3	Akku	8
2.3.4	Invertteri	9
3	Aurinkoinvertteri	10
3.1	Aurinkoinvertterin komponentteja	12
3.1.1	EMI-suodatin	12
3.1.2	LCL-suodatin	13
3.1.3	Vaihtosuuntaaja	15
3.1.4	MPPT-säätöyksikkö	16
4	Mittausjärjestelyn kehittäminen	18
4.1	Laboratoriotyön vaatimukset	18
4.2	Tutkimuksen lähtökohta	19
4.3	Kytkenän suunnittelu ja valmistelu	20
4.4	Kytkenän toteutus	21
4.4.1	Ensimmäinen kytkentä	21
4.4.2	Toinen kytkentä	22
4.4.3	Kolmas kytkentä	22
4.5	Laitteiston käynnistys	24

5	Mittausjärjestelyn toteutus	24
5.1	Mittauksen suorittaminen	24
5.2	Tehoanalysointilaitteen ja oskilloskoopin mittaustulosten tarkastelu	25
5.3	Sähkölaadun analysointilaitteen mittaustulosten tarkastelu	28
5.3.1	Jännitteen ja virran harmoniset kokonaissäröt	28
5.3.2	Jännitteen ja virran yliaallot	29
6	Mittausjärjestelyn lopputulos ja jatkotoimet	31
6.1	Lopputulos	31
6.2	Jatkotoimet	31
7	Yhteenveto	32
	Lähteet	33
	Liitteet	
	Liite 1. Virran ja jännitteen käyrämuodot	

Lyhenteet

ABB	Asea Brown Boweri
AC	<i>Alternating Current.</i> Vaihtovirta.
CMN	<i>Common Mode Noise.</i> Yhteismuotoinen kohina.
DC	<i>Direct Current.</i> Tasavirta.
DMN	<i>Differential Mode Noise.</i> Eromuotoinen kohina.
EMC	<i>Electromagnetic Compatibility.</i> Sähkömagneettinen yhteensopivuus.
EMI	<i>Electromagnetic Interference.</i> Sähkömagneettinen häiriö.
GTO	<i>Gate Turn-Off Thyristor.</i>
IGBT	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor.</i> Eristehilatransistori.
LC	Kelasta ja kondensaattorista muodostuva suodatin.
LCL	Kahdesta kelasta ja kondensaattorista muodostuva suodatin.
MOSFET	<i>Metal-Oxide Semiconductor Field Effect Transistor.</i>
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking.</i> Maksimitehopiste seuranta.
PVS300	ABB:n suunnittelema ja rakentama aurinkoinverterti.
PWM	<i>Pulse-Width Modulation.</i> Pulssinleveysmodulaatio.
THD	<i>Total Harmonic Distortion.</i> Harmoninen kokonaissärö
Triac	<i>Triode alternating current.</i>

1 Johdanto

Tässä insinööriyössä tavoitteena on selvittää, voidaanko ABB:n PVS300-aurinkoinvertteristä modifioida opetuskäyttöön soveltuva opetuslaite ja laboratoriotyö. Työ tehdään Metropolia Ammattikorkeakoululle, jonne suunniteltiin Albertinkatu 40 - 42:een sähkötekniikan sähkökonelaboratorioon uusien opetuslaitteiden hankintaa.

Tutkimuksessa perehdytään hyvän laboratoriotyön vaatimuksiin, ja selvitetään aurinkoinvertterin mittaussmahdollisuuksia. Lisäksi aurinkoinvertterille suunnitellaan ja toteutetaan mittauskytkentä. Mittauskytkennällä suoritetaan vastaavia mittauksia, joita mahdollisessa tulevassa laboratoriotyössä olisi tarkoitus suorittaa.

Työn teoriaosuudessa käsitellään aurinkosähköjärjestelmiä ja niiden komponentteja sekä perehdytään tarkemmin aurinkoinverttereiden tekniikkaan. Teoriaosuudessa käsitellään aurinkosähköjärjestelmiä, koska aurinkoinvertterit ovat monesti osana näitä järjestelmiä. Aurinkoenergian käyttö on myös nopealla tahdilla lisääntyvä energiamuoto. Varsinkin maapallon energiavarojen väheneminen ja hiilidioksidipäästöjen jatkuva lisääntyminen ovat lisänneet aurinkoenergian käytön suosiota ympäri maailmaa.

2 Aurinkosähköjärjestelmät

Yleisimmät aurinkosähköjärjestelmät ovat verkkoon kytketty ja omavarainen järjestelmä. Järjestelmien ytimenä ovat aurinkokennot, jotka muuttavat auringosta tulleen säteilyn tasavirtasähköksi. Tasavirtasähkö ohjataan suoraan kulutuslaitteille, varastoon akuille tai sähköverkkoon verkkoinvertterin avulla riippuen siitä, minkälaisesta järjestelmästä on kyse. Aurinkosähköjärjestelmien yleisimmät osat ovat

- aurinkopaneeli
- lataussäädin
- akusto
- invertteri.

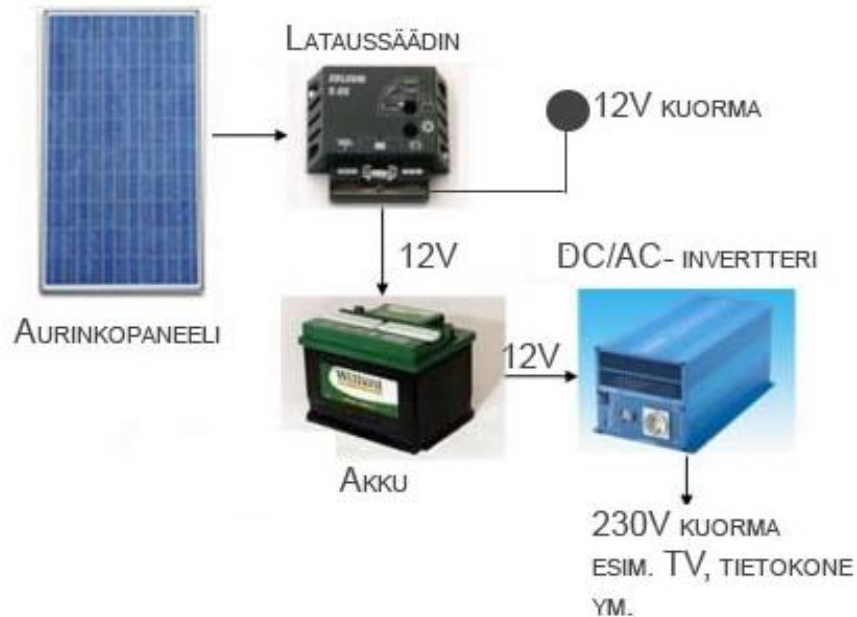
Aurinkopaneeleilta saatavaan virran ja jännitteen suuruuteen voidaan vaikuttaa kytkennällä. Kun kytketään paneelit rinnan, saadaan virtaa kasvatettua. Kun vastaavasti kytketään sarjaan, paneeleilta saatu jännite kasvaa suuremmaksi. Hyödynnettäessä eri kytkentätapoja voidaan rakentaa halutunlainen järjestelmä käyttötarkoituksen mukaan. [1, s. 30.]

2.1 Omavarainen aurinkosähköjärjestelmä

Omavaraisia aurinkosähköjärjestelmiä käytetään paikoissa, joissa ei ole sähköverkkoa kuten esimerkiksi kesäasunnoissa. Näissä järjestelmissä aurinkopaneelit syöttävät tasavirtaa, joka varastoidaan lataussäätimen kautta akustoon. Akuston takia lataussäädin aurinkosähköjärjestelmässä on välttämätön. Se estää akuston yllilatautumisen, ylikuumentumisen sekä akun syväpurkautumisen aurinkopaneelien kautta. Syväpurkautumisen välttämiseksi lataussäädin tulee aina sijoittaa järjestelmässä aurinkopaneelien ja akuston väliin (ks. kuva 1 seur. s.).

Omavaraisessa järjestelmässä kulutuslaitteet ottavat tasasähköä suoraan lataussäätimen kautta tai tarpeen mukaan akustolta. Akkuihin varastoitu sähköenergia voidaan myös muuttaa tasavirrasta normaalijännitteiseksi vaihtovirraksi invertterin avulla. Invert-

teri nostaa jännitetason sopivaksi ja muuntaa tasavirran vaihtovirraksi. Vaihtosähköllä voidaan käyttää tavanomaisia kodinkoneita, kuten televisio, radio, jääkaappi, kahvinkeitin ja mikroaaltouuni. Invertteri pitää kytkeä suoraan akustoon, koska se voi ottaa suuria virtoja, eikä lataussäädin ei kestä suuria virtapiikkejä. Tällöin vaaraksi tulee akuston syväpurkautuminen, mutta lataussäätimen pitäisi suojata sitä siltä.



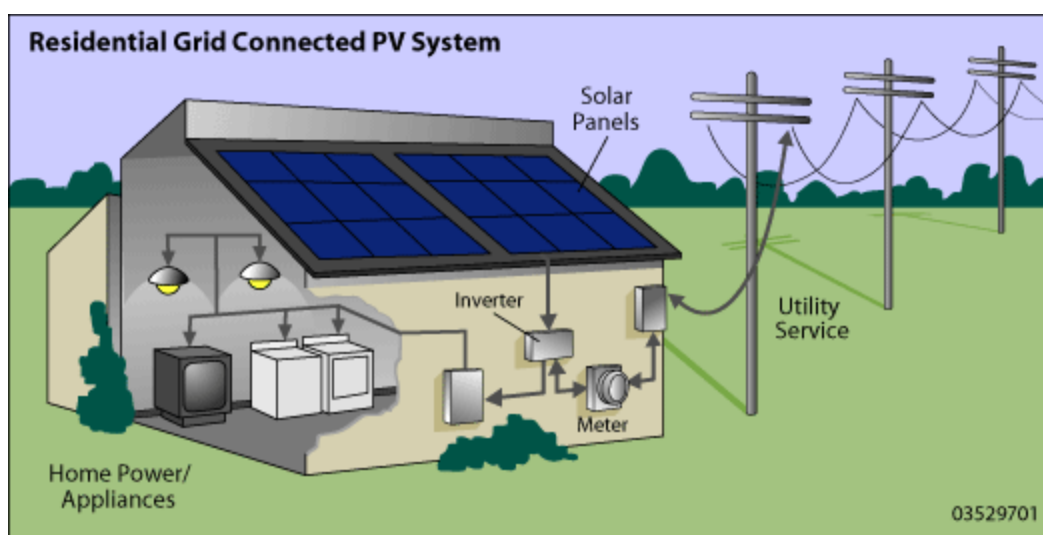
Kuva 1. Omavaraisen aurinkosähköjärjestelmän periaatekaavio [2.]

Omavaraisissa aurinkosähköjärjestelmissä, joissa ei ole ollenkaan akustoa, aurinkopaneelit syöttävät tasasähköä suoraan kulutuslaitteille. Akuttomissa järjestelmissä voidaan käyttää kulutuslaitteita, jotka toimivat jaksoittain, kuten vesipumppu tai tuuletin. Akuttomia omavaraisjärjestelmiä on olemassa todella vähän, koska niitä voidaan käyttää vain harvoilla laitteilla. Kyseisellä järjestelmällä ei myöskään ole mitään varmuutta sähköstä, kuten akullisilla järjestelmillä, koska sähköenergiaa ei saada varastoitua mihinkään pilvisiä päiviä varten. [1, s. 31; 3; 4, s. 25.]

2.2 Verkkoon kytketty aurinkosähköjärjestelmä

Toimiakseen verkkoon kytketyn aurinkosähköjärjestelmän pitää, nimensä mukaisesti, olla koko ajan kytkettynä sähköverkkoon. Verkkoon kytketyt järjestelmät ovat pääasiassa asuinrakennuksen omaa sähköntuotantoa varten. Verkkoon kytketyissä järjestelmissä ei yleensä käytetä akustoa, vaan saatu sähköenergia ohjataan suoraan asuinrakennuksen sähköverkkoon.

Kuvassa 2 nähdään verkkoon kytketyn aurinkosähköjärjestelmän pääkomponentit ja niiden väliset yhteydet. Kuvan 2 verkkoinverteri DC/AC muuntaa aurinkopaneeleilta tulevan tasasähkön asuinrakennuksen vaihtosähköverkkoon sopivaksi. Inverteriltä kaksisuuntaisen energianmittauksen ja muuntajan kautta saadaan myös ylimääräinen sähkö syötettyä valtakunnan sähköverkkoon.



Kuva 2. Verkkoon kytketty aurinkosähköjärjestelmä [1, s. 36.]

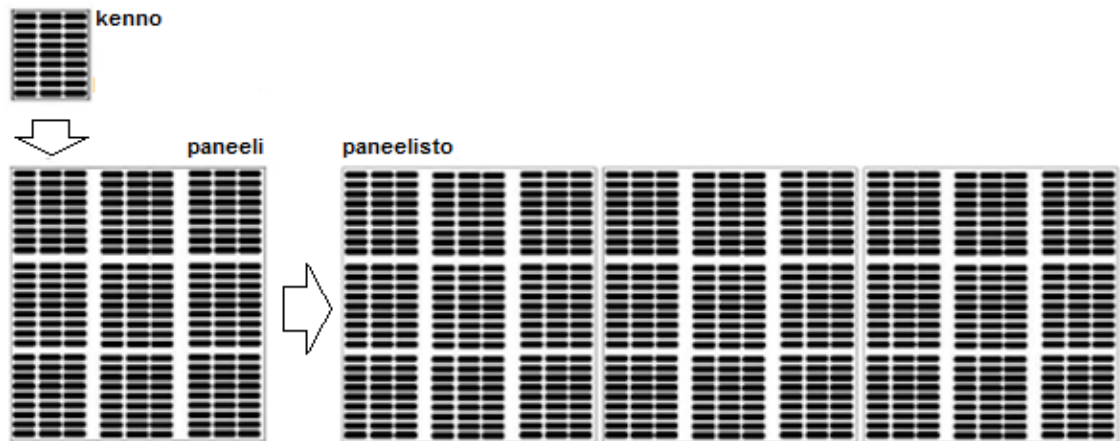
Verkkoon kytketyn järjestelmän etu on, että sähkönsaanti on koko ajan taattua. Jos aurinkosähköä ei saada tarpeeksi tuotettua, saadaan sähköä aina valtakunnan sähköverkosta. Mikäli järjestelmässä on akusto, niin siihen varautunut energia käytetään ennen kuin sähköä otetaan valtakunnan sähköverkosta. Aurinkosähköä voidaan syöttää myös tarvittaessa valtakunnan sähköverkkoon. Yleensä näin tehdään silloin, kun sähkönsaanti ylittää omat tarpeet.

Ylimääräisestä sähköverkkoon syötetystä aurinkosähköstä on mahdollista saada rahallista hyötyä. Silloin järjestelmässä tulee olla kaksisuuntainen energianmittaus. Suomessa rahallista hyötyä ei kuitenkaan toistaiseksi voi saada, koska yksityisille talouksille ei ole olemassa syöttötariffia. Suomessa tällaisessa tapauksessa, jossa aurinkosähköä saadaan enemmän kuin tarvitaan, kannattaa liittää järjestelmään akusto aurinkosähkön varastointia varten. Järjestelmiä, jossa aurinkosähköä käytetään pääenergian lähteenä ja vasta kuormituksen ylittäessä aurinkosähköjärjestelmän kapasiteetin, käytetään valtakunnan verkosta sähköä. Näitä järjestelmiä kutsutaan hybridijärjestelmiksi. [1, s. 36; 4, s. 24 - 25; 5.]

2.3 Aurinkosähköjärjestelmän komponentit

2.3.1 Aurinkokenno

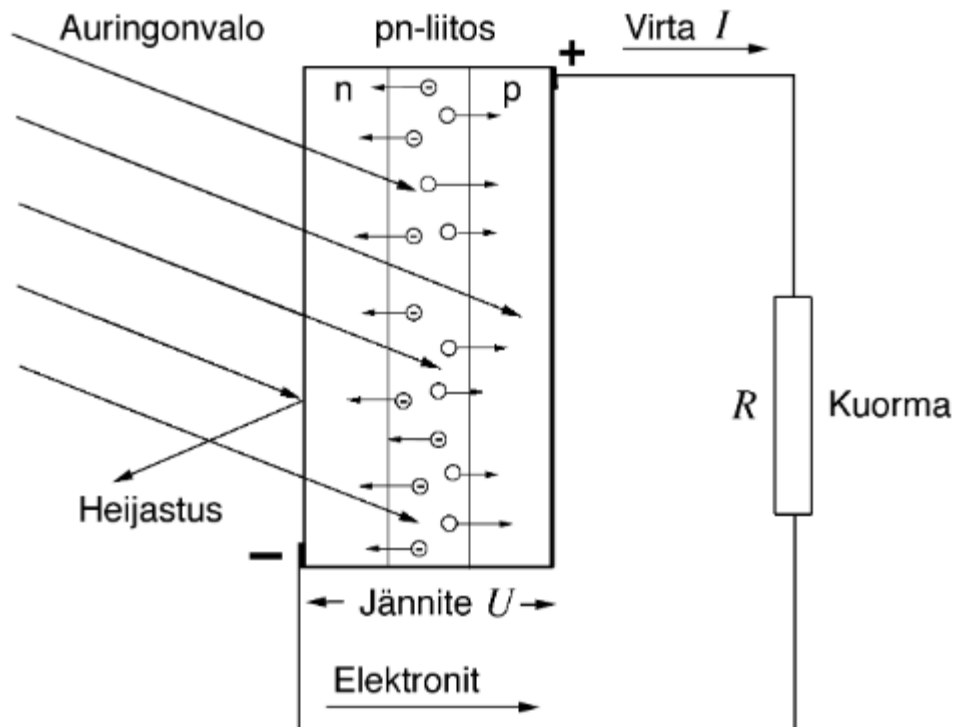
Aurinkokenno toimii aurinkosähköjärjestelmän ytimenä. Se muuttaa auringosta tulevan säteilyn tasavirtasähköksi. Yhden kennon (10 cm x 10 cm) antama jännite on 0,5 V:n luokkaa ja virta on maksimissaan 3,5 A. Aurinkopaneeli muodostuu useasta aurinkokennosta, mikä nähdään kuvasta 3. Yksityiskäyttöisissä aurinkosähköjärjestelmissä käytetään yleensä juuri aurinkopaneeleita. Niiden teho on kymmenistä wateista satoihin watteihin. Kennoja voidaan yhdistellä joko sarjaan tai rinnan riippuen siitä, minkä tehoinen aurinkopaneeli halutaan. Yleensä yhdessä paneelissa on 36 kennoa, jolloin siitä saadaan yleisimmin käytetty 12 V:n jännite. Aurinkokennojen yleisin materiaali on pii (Si). Sitä voidaan käyttää kolmessa eri muodossa: yksi- ja monikiteisenä sekä amorfisena.



Kuva 3. Aurinkokenno, -paneeli ja -paneelisto

Kuvasta 3 voitiin havaita, että paneelisto muodostuu useasta paneelista. Näin ollen voidaan huomata, että rakenne on moduulirakenteinen ja helposti laajennettava. Paneelistoja käytetään pääsääntöisesti aurinkopuistoissa tai yritysten omaan käyttöön tehdyissä aurinkosähköjärjestelmissä.

Perinteisissä aurinkokennoissa on p- ja n-tyypin puolijohdekerrokset ja niiden välissä pn-liitos. Pn-liitoksessa osasta auringosta tulevan säteilyn valohiukkasista voidaan muodostaa elektroni-aukkopareja. Näistä pareista elektronit kulkeutuvat n-puolelle ja aukot p-puolelle. Rajapintaan muodostuneen sähkökentän vuoksi elektronit voivat kulkea vain tiettyyn suuntaan. Siksi elektronit kulkeutuvat ulkoisen johtimen avulla p-tyypin puolijohteeseen, jossa ne voivat sitten yhdistyä aukkojen kanssa. Näin ollen vastakaismerkkisiä varaustenkuljettajia on jatkuvasti eri puolilla liitosta, joten liitos voi toimia ulkoisen piirin jännitelähteenä. Aurinkokennon rakenne ja toimintaperiaate esitetään kuvassa 4 (seur. s.). [6, s. 1 - 3.]



Kuva 4. Aurinkokennon rakenne ja toimintaperiaate [6, s. 1.]

2.3.2 Lataussäädin

Lataussäädin eli ohjausyksikkö huolehtii akuston sopivasta latauksesta. Sen tarkoitus on rajoittaa latausvirtaa ja suojata näin samalla akustoa ylilatautumiselta. Tarpeen vaatiessa lataussäädin myös kytkee akuston kokonaan irti paneelistä. Lataussäädin tulee aina asentaa aurinkopaneelien ja akuston välille. Sen toiminta voi perustua muun muassa jännitteen mittaukseen, pulssileveyden modulaatioon tai lämpötilan kompensointiin. Lataussäätimen ominaisuuksiin kuuluu myös kuorman irrottaminen akuston tyhjentäessä. Nykypäivän säätimissä on myös estodiodi, joka estää akuston purkautumisen aurinkopaneeliin päin tasapainottaakseen sähköjärjestelmän tehotasoa. Estodiodia kutsutaan myös suunnanestodiodiksi.

Uudet lataussäätimet on ohjelmoitu lataamaan akkuja juuri oikealla tekniikalla riippumatta siitä, mitä akkua käytetään. Lisäksi uudet lataussäätimet hallitsevat latauksen kolme eri toimintatasoa: tehollataus (0 - 80 %), varauslataus (80 - 100 %) ja lepolataus eli lataus, kun akku on pois käytöstä. Hyvä lataussäätimen pidentävät akkujen elinikää huomattavasti. Samoin myös lataussäätimet, jotka hallitsevat edellä mainitut kolme eri toimintatasoa.

Akuille parhaiten soveltuva säädintekniikka on PWM-tekniikka. Se perustuu pulssileveyden modulaatioon. PWM-tekniikan avulla saadaan akun varaustila pysymään mahdollisimman korkealla. Aurinkoenergian saannin maksimoimiseen PWM-piiri kytkee aurinkoenergian lähteen päälle ja pois jännitetason pitämiseksi halutulla tasolla. Tätä ennen akun on kuitenkin pitänyt saavuttaa haluttu jännitetaso. Seuraavassa kuvassa 5 on PWM-tekniikalla varustettu lataussäädin.



Kuva 5. Lataussäädin Steca PR 3030 [7.]

PWM-tekniikkaa uudempi säätöyksikkö on MPPT-tekniikka. MPPT eli maksimitehopisteen seuraaja on säätöyksikkö, joka saa paneelin ulostulojännitteen toimimaan maksimitehopisteessä. Se säätää kuorman vastaamaan tuotantoa, joten sillä päästään pienilläkin säteilytehoilla hyvään hyötysuhteeseen. Aurinkopaneelien ominaiskäyrän takia maksimitehopisteestä saadaan paras energiantuotto irti. MPPT-tekniikkaa käytetään lähes poikkeuksetta kaikissa uusissa inverttereissä. [8, s. 16; 9, s. 41 - 42; 10, s. 23 - 25; 9; 12.]

2.3.3 Akku

Akku on sähkökemiallinen laite, joka ladattaessa muuntaa sähköenergian kemialliseksi energiaksi ja purettaessa varausta muuntaa sen takaisin sähköenergiaksi kuormaan. Akkuja käytetään yleensä omavaraisissa aurinkosähköjärjestelmissä. Akkuihin varattavalla energialla voidaan tasoittaa aurinkosähköjärjestelmän mahdollisesti aiheuttamia kulutuspiikkejä, joita syntyy varsinkin auringon ollessa pilvessä. Lisäksi akkuihin varastoidun energian avulla pystytään tasoittamaan jännitevaihteluja. Akut voidaan jakaa rakenteen puolesta kolmeen pääryhmään: avoimet lyijyakut, suljetut lyijyakut ja geeli- eli hyytelöakut (ks. kuva 6). Tavallisimmat nimellisjännitetasot ovat 6 V, 12 V ja 24 V.



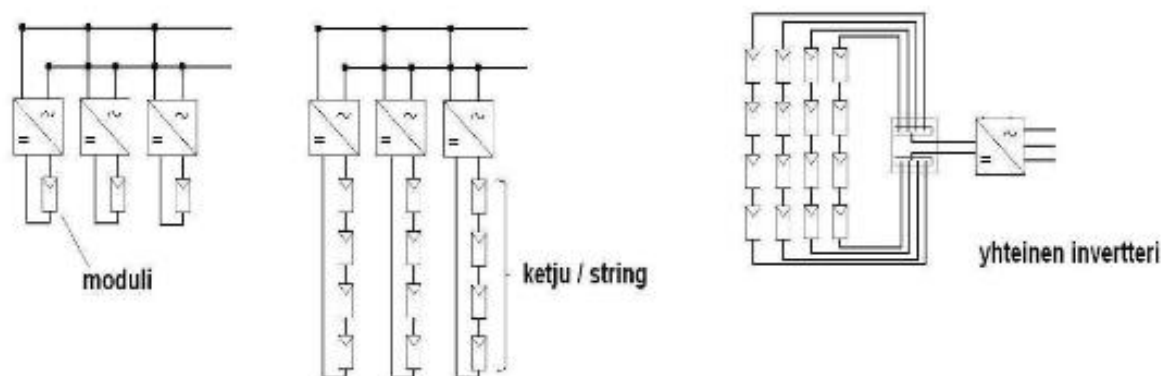
Kuva 6. Vasemmalta oikealle: avoin lyijyakku, suljettu lyijyakku ja geeli- eli hyttelöakku [1, s. 34.]

Avonainen lyijyakku on mökkikäytössä selvästi suosituin, perustuen suoraan hinta-toimivuusvarmuus-suhteeseen. Lisäksi lyijyakuissa on suuri kapasiteetti, ja ne kestävät huomattavasti muita akkuja paremmin muun muassa syväpurkauksia. [11; 13.]

2.3.4 Invertteri

Invertteri eli vaihtosuuntaaja muuntaa aurinkopaneeleilla tuotetun tasasähkön (DC) kulutuslaitteille soveltuvaksi vaihtosähköksi (AC). Yksinkertaisimmat invertterit koostuvat oskillaattorin ohjaamasta transistorikytkennästä, joka katkoo tasajännitettä muodostaen kantiaaltoa. Kantiaalto johdetaan muuntajaan, jossa se ikään kuin suodatetaan. Näin saadaan halutun suuruinen ja taajuinen vaihtojännite.

Invertterit jaetaan tavallisiin inverttereihin ja verkkoon kytkettäviin inverttereihin. Suurin ero tavallisen invertterin ja verkkoinvertterin välillä on se, että verkkoinvertterin täytyy tuottaa samanvaiheista jännitettä verkon kanssa. Verkkoinvertterin täytyy myös syöttää tarpeeksi suurta jännitettä, jotta sähkövirta kulkisi verkkoon päin. Lisäksi verkkoinvertterin pitää kytkeytyä irti verkosta, jos verkon jännite putoaa olemattomiin. Pienimmät invertterit (50 - 100 W) ovat yleensä yksityiskäyttöön ja suurimpia (yli 100 kW) käytetään muun muassa aurinkosähköpuistoissa. Hyötysuhteet inverttereillä vaihtelevat yleensä 85 - 95 %:n välissä. Tavallisesti mitä pienempi invertteri on, sitä huonompi on sen hyötysuhde. Monet invertterit toimivat nykyään jo lähempänä 95 %:n hyötysuhdetta. Nykyisistä verkkoinverttereissä lähes jokaisesta löytyy sisältä MPPT-säätöyksikkö, joka toimii invertterin ohjausyksikkönä.



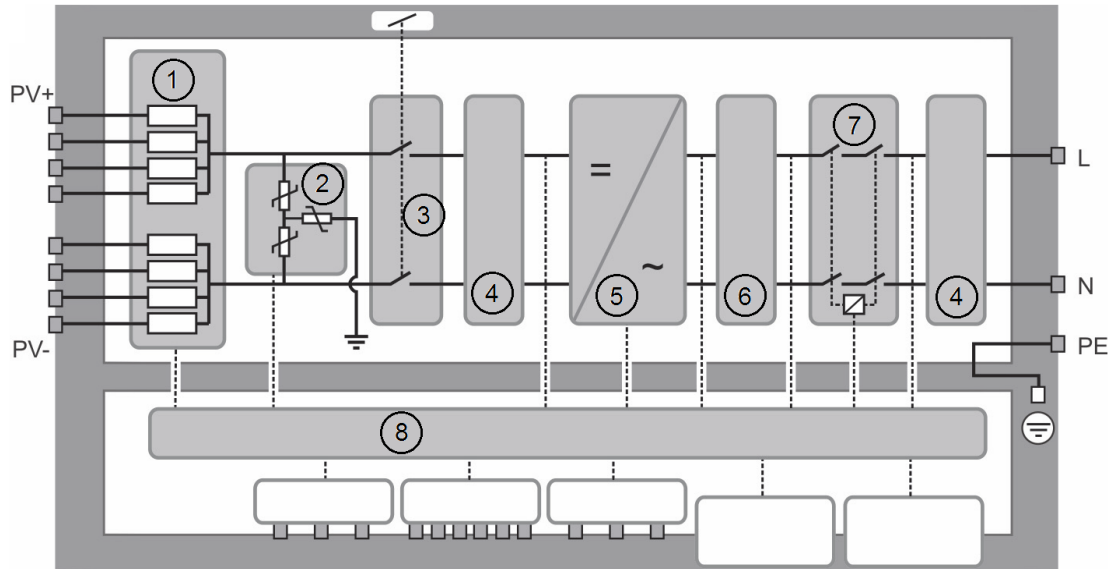
Kuva 7. Erilaisia invertterikytkentöjä [8, s. 18.]

Edellä olevasta kuvasta 7 voitiin nähdä erilaisia invertterin kytkentämahdollisuuksia. Pienissä järjestelmissä invertteri voidaan laittaa erikseen jokaisen paneelin perään. Tällöin puhutaan mikroinverttereistä. Yleensä invertteri on kuitenkin laitettu sarjaan kytketyn paneeliketjun perään. On myös mahdollista, että usea sarjaan kytketty paneeliketju kytketään yhteen ja perään tulee vain yksi yhteinen invertteri. Tehontarpeesta riippuen inverttereitä on olemassa yksi- ja kolmivaiheisia. Pienillä paneelitehoilla käytetään yleensä yksivaiheinverttereitä. Suuremmissa järjestelmissä, joissa paneeleita kytketään kolmeen vaiheeseen, käytetään kolmivaiheinverttereitä. Myös yksivaiheinverttereitä voidaan suuremmissa järjestelmissä käyttää, mutta silloin jokaiselle vaiheelle täytyy kytkeä oma invertteri. [1, s. 35 - 36; 8, s. 17; 14, s. 24.]

3 Aurinkoinvertteri

Aurinkoinvertteri tunnetaan myös nimellä verkkoinvertteri, ja se on käyttäjän näkökulmasta hyvin yksinkertainen laite. Kytketään vain tulo aurinkopaneeleilta ja lähtö verkkoon, niin loput verkkoinvertteri hoitaa itse. Verkkoinvertterit toimivat kaikessa yksinkertaisuudessaan siten, että aluksi katkoja pilkkoo tasajännitteen tehotransistorien avulla kanttiaalloksi. Tämän jälkeen kanttiaalto muuttuu suodatinpiirien ja sähköverkon reaktiivisen kuorman vaikutuksesta siniaalloksi. Verkkoinvertterit sisältävät yleensä tarvittavan suojauksen laitteiston verkkoon liittämistä varten. Erillisiä suojauslaitteita ei tarvita, jos invertteri täyttää irtikytketymisvaatimukset. [14, s. 23 ja s. 26.]

ABB:n PVS300 aurinkoinvertteri, jota käytettiin tutkimuksessa, koostuu pääosin EMI-suodattimesta, LCL-suodattimesta, invertteristä, AC-kontaktorista sekä erilaisista suo-
jauksista. Invertterin ohjauksen hoitaa MPPT-säätöyksikkö.



Kuva 8. PVS300 aurinkoinvertterin lohkokkaavio

Aurinkoinvertterin PVS300 -lohkokkaavio on esitetty kuvassa 8. Kuvasta nähtiin, mitä aurinkoinvertterin sisällä on ja mihin järjestykseen komponentit ovat kytkettynä aurinkoinvertterissä. Numeroidut komponentit selitetään taulukossa 1.

Taulukko 1. PVS300 lohkokkaavion numeroitujen komponenttien selitykset

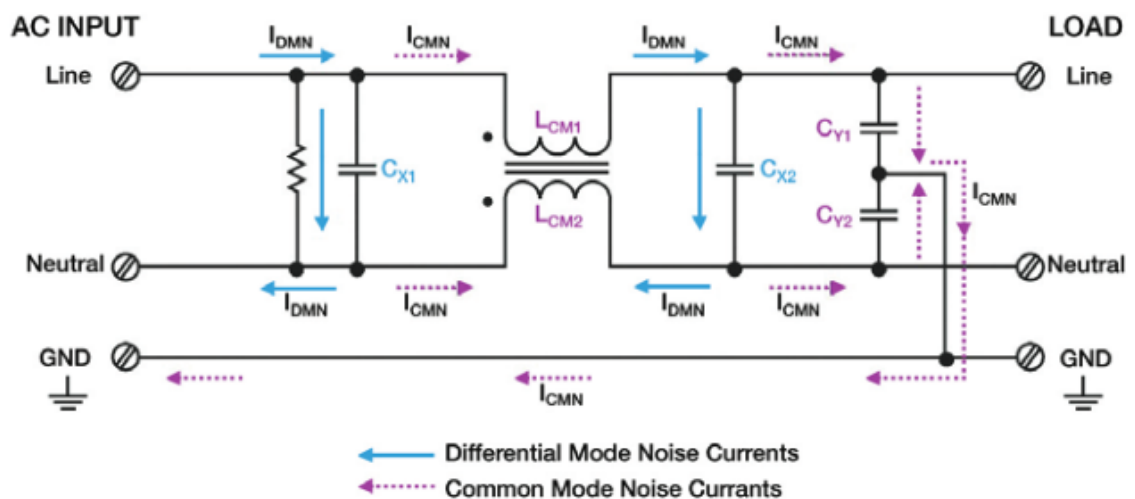
Nro	Komponentti	Kuvaus
1	Paneeliketjujen sulakeet	Oikosulkusuoja paneeliketjujen piireille
2	Ylijännitesuoja	Suojaa jännitepiikeiltä
3	DC-kytkin	Invertterin on/off kytkin
4	EMI-suodatin	Vaimentaa sähkömagneettisia häiriöitä
5	Invertteri	Muuntaa tasajännitteen vaihtojännitteeksi
6	LCL-suodatin	Poistaa AC jännitesäröjä ja virran yliaaltoja
7	AC kontaktori	Kytkee AC kuormitusvirran
8	Ohjaus ja valvonta	Ohjaa ja valvoo piirejä

3.1 Aurinkoinvertterin komponentteja

3.1.1 EMI-suodatin

EMI-suodatin eli sähkömagneettisten häiriöiden suodatin. Kaikki elektroniset laitteet, joita nykyään tuotetaan, sisältävät EMI-suodatuspiirin. Laitteilla on olemassa tiukat määräykset koskien EMI-suodatusta. Välillä edes laitteeseen laitettu EMI-suodatuspiiri ei riitä vaan tarvitaan lisäksi ylimääräinen suodatin. Suodatuspiirit valmistetaan EMC-standardien mukaisesti. Standardien mukaan EMI:n taajuusalue on yleensä määritelty 150 kHz:n ja 30 MHz:n välille. Jossain tapauksissa alue alkaa jo niinkin alhaalta kuin 10 kHz:stä.

Käytännössä kaikki sähkö- tai elektroniikkalaitteet voivat luoda ja/tai vaikuttavat sähkömagneettisiin häiriöihin. Näitä ovat muun muassa tietokone, virtalähteet ja mikroaaltouunit. Koska ei-toivotut sähkömagneettiset häiriöt ovat paljon korkeampia taajuuksia kuin normaalit signaalit, niin EMI-suodatin toimii valikoivasti estämällä tai siirtämällä ei-toivottuja korkeampia taajuuksia. EMI-suodattimen induktiivinen osa on suunniteltu toimimaan matalataajuisena syöttölaitteena AC-johtimen taajuuksille ja korkeiden taajuuksien estolaitteena. Suodattimen muut osat käyttävät kondensaattoreita ohittamaan tai siirtämään ei-toivottua korkeataajuisia melua pois herkiltä piireiltä. EMI-suodatin siis joko vähentää huomattavasti tai poistaa kokonaan ei-toivottuja kohinasignaaleita suojatuilta laitteilta.



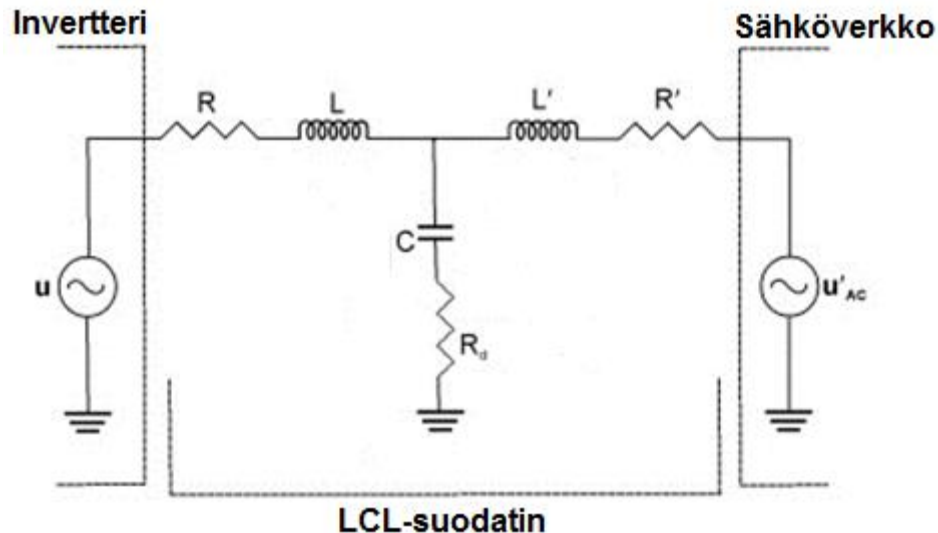
Kuva 9. Kytentäkaavio tyypillisestä EMI-suodattimesta [15.]

Sähkömagneettiset häiriöt jaetaan kahteen päätyyppiin: yhteis- (CMN) ja eromuotoiseen (DMN) kohinaan. Yhteismuotoista kohinaa kutsutaan myös epäsymmetriseksi tai *line-to-ground* kohinaksi. Sitä on olemassa molemmin puolin AC-syöttöä (vaihe ja nolla), ja se on samassa tahdissa itsensä kanssa maahan nähden. Kuten kuvasta 9 (ks. s.12) nähtiin, CMN virta kulkee samaan suuntaan molemmissa johtimissa ja palaa maadoitusjohtimen kautta takaisin. Yhteismuotoista kohinaa voidaan vaimentaa käyttämällä keloja EMI-suodattimien sisällä. Lisäksi EMI-suodatin pitää sijoittaa sarjaan kunkin voimajohdon kanssa. Vaimennusta saadaan aikaan myös lisäämällä Y-kondensaattorit, jotka kytketään molemmista voimajohtimista maahan.

Eromuotoinen kohina tunnetaan myös symmetrisenä ja *line-to-line* kohinana. Kohinaa on verkkojohtimen ja nollajohtimen välillä, ja se on 180 astetta epätahdissa itsensä kanssa. DMN virta kulkee vaihejohdinta pitkin ja palaa nollajohdinta pitkin (kuva 9). DMN virta ei kulje maajohtimessa. Eromuotoinen kohina voidaan estää käyttämällä X-kondensaattoreita EMI-suodattimien sisällä. Lisäksi ne tulee kytkeä vaihejohtimen ja nollajohtimen välille. Joissakin tapauksissa, kun DMN on erittäin korkea, eromuotoisen kohinan tukahduttamisessa kelat voivat olla tarpeen. [15.]

3.1.2 LCL-suodatin

LCL-suodatin on LC-suodattimeen perustuva suodatin, joka eroaa LC-suodattimesta siten, että sitä on tehostettu ylimääräisellä kelalla. LCL-suodatin koostuu kahdesta sarjaan kytketystä kelasta ja niiden väliin rinnalle kytketystä kondensaattorista. LCL-suodatin on mahdollista toteuttaa suhteellisen pienillä komponenteilla verrattuna LC-suodattimeen. Sen takia kustannuksetkaan eivät nouse kovin korkeiksi. Lisäksi huomattavana etuna LC-suodattimeen voidaan pitää sitä, että LCL-suodatin pystyy toimimaan molempiin suuntiin. Kuvassa 10 (seur. s.) tyyppillisen LCL-suodattimen periaatekuva, jossa resistanssit ovat johtimista aiheutuvia. LCL-suodatin voidaan suunnitella kolmella eri tekniikalla, joilla jokaisella saadaan toimiva suodatin. Suunnittelutekniikat ovat Liserre-menetelmä, resonanssitaajuuteen perustuva menetelmä ja edellä mainittujen yhdistelmä. Yleisin näistä kolmesta on resonanssitaajuuteen perustuva menetelmä.



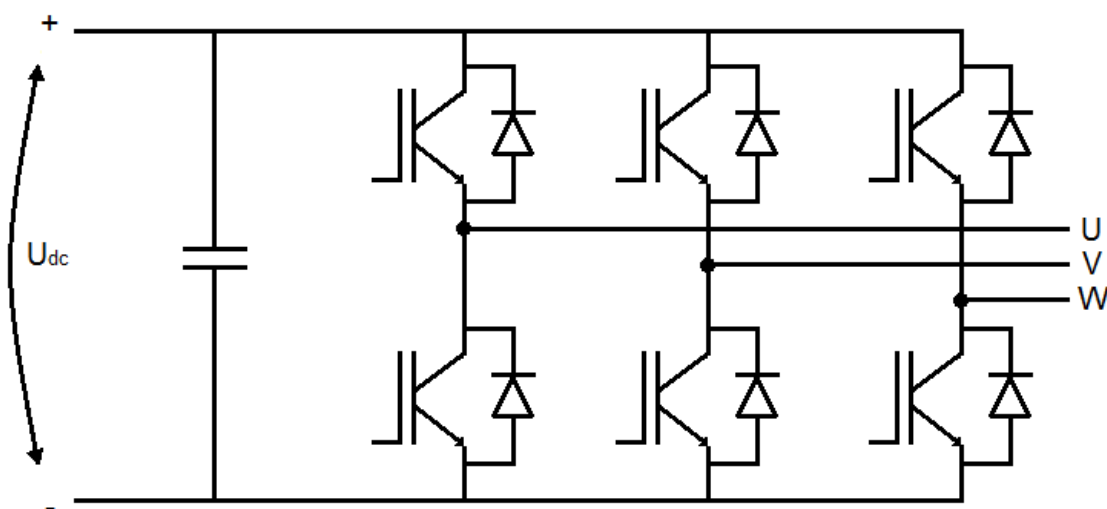
Kuva 10. LCL-suodattimen periaatekuva

LCL-suodattimen päätarkoituksena on vähentää tai poistaa kokonaan invertterin synnyttämiä perustaajuutta korkeataajuisempia taajuuskomponentteja ja toimia invertterin toiminnan kannalta välttämättömänä energiavarastona. Ylimääräiset korkeammat taajuuskomponentit aiheuttavat säröjä sekä virtaan että jännitteeseen. LCL-suodattimen avulla invertterin verkkovirran kokonaissärö saadaan useassa tapauksessa suodatettua jopa muutamaan prosenttiin. Kokonaissäröä kuvataan THD-arvolla.

Standardit määrittävät virralle ja jännitteelle maksimi särövaatimukset. Suodattimen stabiilius on vaimennuskyvyn lisäksi suodattimelle todella tärkeä ominaisuus. Valitsemalla suodattimen resonanssitaajuuudet tarpeeksi kauas järjestelmästä tulevista herätteiden taajuuksista saadaan stabiiliutta parannettua. Usein joudutaan kuitenkin lisäämään suodattimeen vielä joko passiivista tai aktiivista vaimennusta. Passiivinen vaimennus on melko helppo toteuttaa, mutta se aiheuttaa lisää suodattimesta syntyviä häviöitä. Siinä lisätään esimerkiksi vaimennusvastukset kondensaattoreiden kanssa sarjaan tai kuristimen kanssa rinnan. Aktiivinen vaimennus vaatii vastaavasti huomattavasti monimutkaisemman säätöjärjestelmän, mutta vaimennus ei tuota ylimääräisiä häviöitä. [16, s. 33 - 36; 17; 18, s. 12; 19, s. 29 - 30.]

3.1.3 Vaihtosuuntaaja

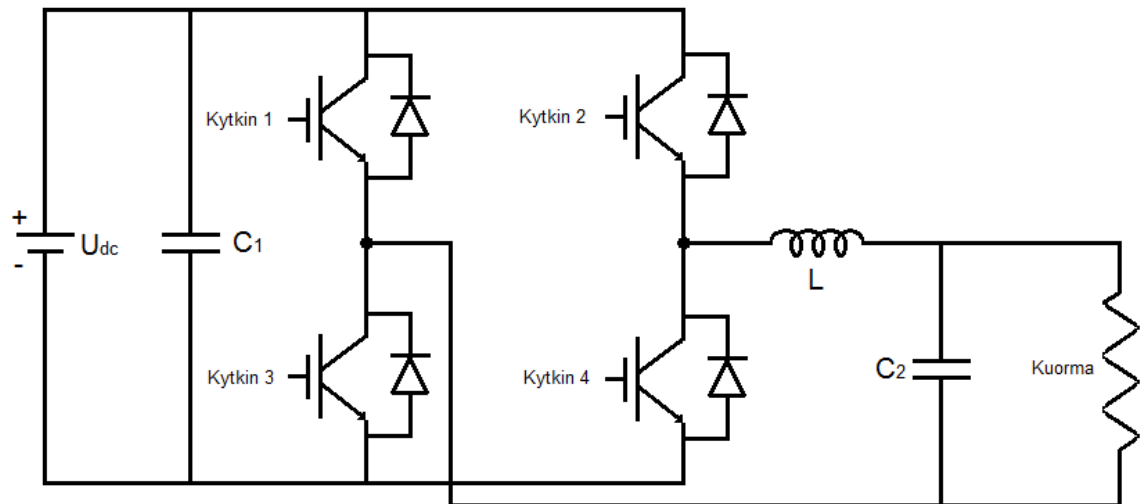
Vaihtosuuntaajan perusidea on muuntaa tasasähköä vaihtosähköksi lähdön tarvitsemalle taajuudelle. Vaihtosuuntaajat voivat toimia joko kiinteällä tai muuttuvalla lähtöjännitteellä ja -taajuudella. Aurinkosähkösovelluksissa lähtöjännite ja -taajuus ovat sähköverkosta riippuvia. Vaihtosuuntaajat rakentuvat kytkinkomponenteista, joita ohjataan johtaviksi ja johtamattomiksi. Ohjaamalla kytkimiä saadaan tehoa siirrettyä DC-kondensaattorilta verkolle. Käyttötarkoituksesta riippuen voidaan käyttää esimerkiksi seuraavia kytkinkomponentteja IGBT, MOSFET, Triac, GTO tai tyristoreja. Kytkinten ohjaamiseen tarkoitettuja menetelmiä on olemassa monia. Menetelmän valintaan vaikuttavat muun muassa tulojännitteen käyttäytyminen tai tavoiteltu lähtöjännite ja -taajuus. Kuvassa 11 nähdään IGBT-kytkimillä toteutettu kolmivaiheinen vaihtosuuntaaja.



Kuva 11. IGBT-kytkimillä toteutettu vaihtosuuntaaja

Vaihtosuuntauksessa käytetään selvästi eniten IGBT-tyyppisiä transistoreja. Niiden suosio perustuu helppoon ohjattavuuteen, siedettävään jännitehäviöön ja toimintakykyyn korkeilla kytkentätaajuuksilla. IGBT saadaan johtavaan tilaan syöttämällä hilalle ohjausjännitettä. Vaihtosuuntaussovelluksissa ohjausjännitteen keston sekä suuruuden valinta vaikuttaa siihen, toimiiko transistori täysin johtavassa vai johtamattomassa tilassa.

Vaihtosuuntaajan tehoelektroniikka osuus koostuu vaihtosuuntaussillasta sekä suodattimesta. Suuntaussilta voi olla joko puoli- tai kokosilta. Puolisilta ei sovellu syöttämään verkkotaajuista kuormaa, joten se ei myöskään sovellu aurinkosähköjärjestelmään. Kuvassa 12 esitetään yksivaiheisen vaihtosuuntaajan yksinkertaistettu rakenne.



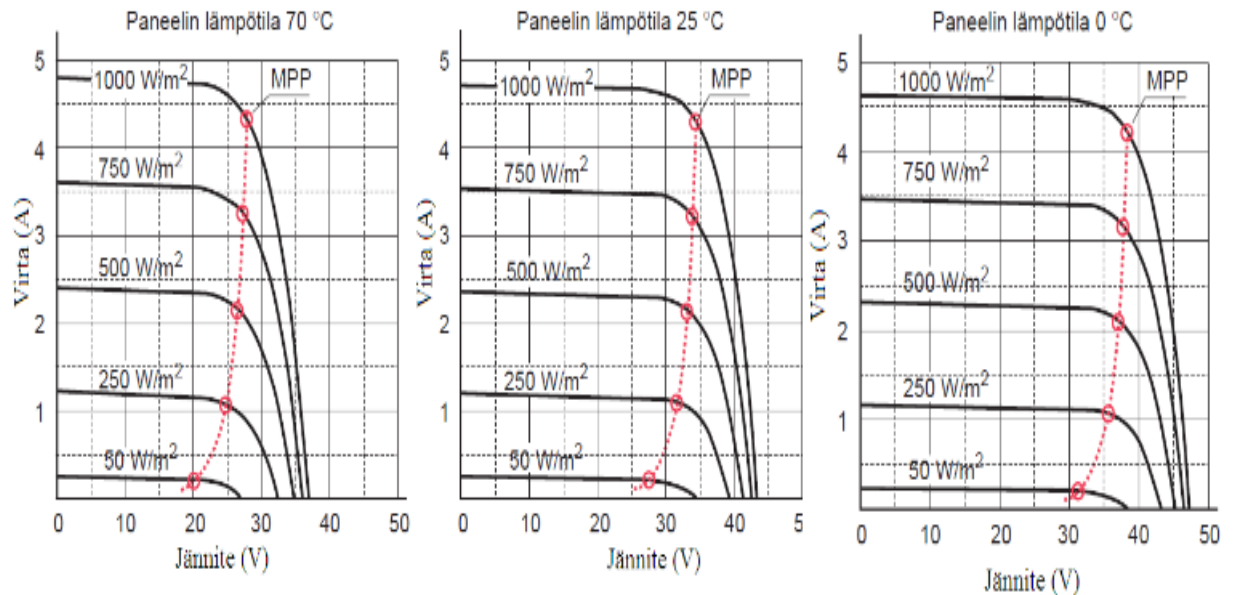
Kuva 12. Yksivaiheisen vaihtosuuntaajan yksinkertaistettu rakenne

Kokosiltatyypinen vaihtosuuntaaja koostuu neljästä kytkimestä, kuten kuvasta 12 havaittiin. Vaihtosuuntaaja tarvitsee ennen siltaa kondensaattorin, joka toimii sen energiavarastona. Sillan jälkeiset kela ja kondensaattori muodostavat LC-suodattimen, joka voidaan toteuttaa tapauksesta riippuen myös LCL-suodattimella. Suodatin vähentää tai poistaa kokonaan lähtöjännitteestä ja kytkentätaajuudesta aiheutuvia taajuuskomponentteja. [20, s. 11 - 12; 21, s. 10 - 12; 22, s. 11.]

3.1.4 MPPT-säätöyksikkö

MPPT eli maksimitehopiste seuranta löytyy nykyisin lähes jokaisesta aurinkoinvertteristä. Maksimitehopisteen seurannalla aurinkosähköjärjestelmä pyritään saada toimimaan mahdollisimman lähellä optimaalista toimintapistettä eli maksimitehopistettä. MPPT:n avulla aurinkosähköjärjestelmästä saadaan kaikissa olosuhteissa irti mahdollisimman paljon tehoa.

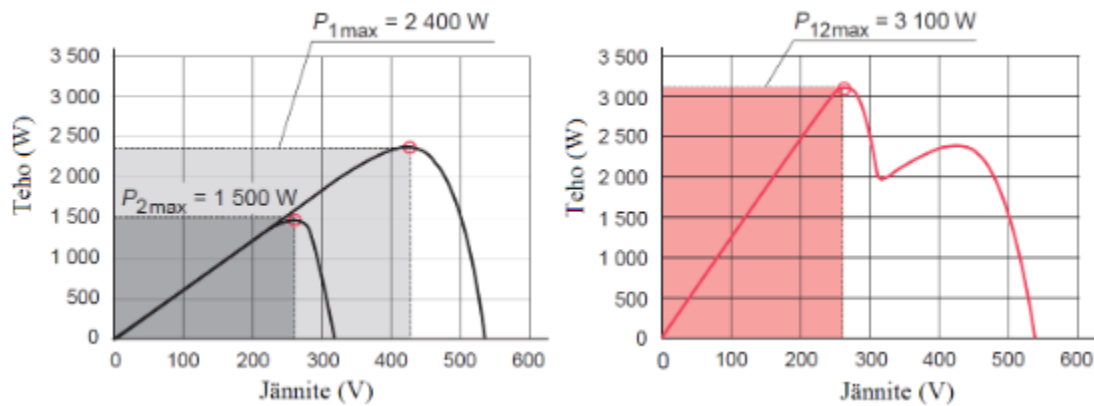
Paneelin lämpötila ja sääolosuhteet vaikuttavat huomattavasti MPPT:n toimintaan. Kuten kuvan 13 virta-jännitekäyristä havaitaan, maksimitehopiste vaihtelee huomattavasti paneelien lämpötilan muuttuessa. Paneelien lämpötila vaikuttaa maksimitehopisteseen niin, että matalalla lämpötilalla maksimitehopiste on suurempi ja päinvastoin.



Kuva 13. Paneelin lämpötilan vaikutus maksimitehopisteseen [14, s. 25.]

Maksimitehopisteen seurannan parhaita ominaisuuksia ovat sen nopeus ja tarkkuus. MPPT-yksikön ominaisuuksia hyödyntäen pystytään maksimitehopiste löytämään mahdollisimman nopeasti ja tarkasti. Näin ollen aurinkopaneeleilta saadaan enemmän sähköenergiaa hyötykäyttöön. Varsinkin puolipilvisinä tai sameina päivinä MPPT:n nopeudesta on suuri apu, sillä paneeleille saapuva teho muuttuu hyvin nopeasti. Tarkkuudesta on enemmän hyötyä kirkkaina ja aurinkoisina päivinä, jolloin epätarkkuudet voivat pitkällä aikavälillä aiheuttaa suuria häviöitä.

MPPT-yksiköitä voi aurinkoinverttereissä olla yksi tai useampi. Suuri tehoisissa inverttereissä niitä on yleensä enemmän kuin yksi. Aurinkosähköjärjestelmästä saadaan paremmin tehoa, jos jokaisella paneeliketjulla on oma MPPT-yksikkönsä. Tämä voidaan havaita kuvasta 14 (ks. seur. s.), jossa vasemman puoleisessa kuvaajassa on kaksi eri tehoista paneeliketjua kytkettynä omiin MPPT-yksikköihin, ja oikean puoleisessa kuvaajassa samat paneeliketjut on kytketty yhteiseen yksikköön. Kuvasta 14 (seur. s.) voidaan selvästi nähdä, että kahden MPPT-yksikön invertterin aurinkosähköteho on suurempi kuin yhden yksikön sisältämä teho. [14, s. 25 - 26; 23; 24, s. 20 - 21.]



Kuva 14. Maksimitehopisteen seuranta kahdella eri kytkennällä [14, s. 26.]

4 Mittausjärjestelyn kehittäminen

4.1 Laboratoriotyön vaatimukset

Hyvä laboratoriotyö opetusolosuhteisiin on kohtuullisen turvallinen, mutta samalla tarpeeksi kiinnostava sekä haastava, jotta opiskelijat motivoituvat laboratoriotyöstä. Näiden lisäksi laboratoriotyön kehittämisessä vaikeuksia lisää työn kesto aika, jonka optimi on 2 - 3 tuntia. Työn olisi hyvä olla nykytekniikkaa, johon laboratoriotyön avulla päästään tutustumaan. Nykytekniikan lisäksi työn pitäisi olla mahdollisimman realistinen, jolle löytyy vastine työelämästä. Se lisää opiskelijoiden motivaatiota entisestään, koska kaikki mikä vastaa työelämää luo lisää kiinnostusta aiheeseen.

Hyvässä laboratoriotyössä on mahdollisuus pohtia etukäteen, mitä mitataan ja miten. Etukäteen voidaan suunnitella esimerkiksi mittauskytkentä tai koodinpätkä, joiden toimintaa sitten testataan laboratoriossa. Laboratoriotyön työohje ei saa kertoa opiskelijoille kaikkea suoraan. Työohjeen täytyy laittaa opiskelijat miettimään, mitä mitataan, miksi ja miten. Työohjeiden tarkoituksellinen vajaavaisuus pakottaa opettajat antamaan ohjeita, mutta lisää myös opiskelijoiden omaa ajattelua. Isona osana hyvään laboratoriotyöhön kuuluu työn valmisteleminen eli koe- ja mittalaitteiden kytkeminen. Tämä on monesti töiden mielenkiintoisimpia osioita.

Itse työn tekemisessä eli mittauksissa pyritään siihen, että voidaan säätää yhtä muuttujaa kerrallaan ja seurata sen vaikutusta muihin tilasuureisiin. Esimerkiksi muutetaan moottorikäytön kuormaa ja seurataan, minkälaisia muutoksia se aiheuttaa moottorivirrälle ja pyörimisnopeudelle. Mittausten tarkoituksena on ymmärtää jonkin luonnonlain,

laitteen tai järjestelmän toimintaa empiirisesti. Mittaustulokset ovat usein numeerisessa muodossa, mutta erilaiset aistein havaittavat tapahtumat ovat myös hyviä, kuten äänet, värinät, lämpö, haju, valo tai räjähdykset. Nämä jäävät usein paremmin mieleen kuin pelkät numeeriset tulokset. Hyvään laboratoriotyöhön kuuluu vielä tulosten käsittely. Tulosten käsittelyssä pitää pystyä analysoimaan saatuja tuloksia. Analysoitavia asioita ovat muun muassa virhelähteet, häiriöt ja luotettavuus. Lisäksi tuloksia täytyy vertailla teoriaan. [25.]

4.2 Tutkimuksen lähtökohta

Kaikki lähti liikkeelle palaverista ABB:n henkilökunnan kanssa. Palaverissa sovittiin, että lähdetään yhdessä toteuttamaan tutkimusta. ABB:n henkilökunnan asiantuntemusta voitiin hyödyntää varsinkin ideointiin ja tarvittaessa suunnitelmien verifiointiin. Tutkimuksessa oli tarkoitus tutkia, voidaanko PVS300-aurinkoinvertteristä modifioida opetuskäyttöön soveltuva opetuslaite sekä laboratoriotyö. ABB:lta saatiin testilaitte, jonka avulla voitiin tehdä mittauksia ja muita havaintoja tutkimukseen liittyen.

ABB:lta saatu testilaitte PVS300-aurinkoinvertteri oli teholtaan 3 300 wattia. Taulukosta 2 (ks. seur. s.) nähdään PVS300-aurinkoinvertterin toiminta- ja raja-arvoja. Tutkimuksen perusteella päätettäisiin, ostetaanko ABB:lta kyseinen aurinkoinvertteri, ja toteutetaanko sillä laboratoriotyö. Aluksi lähdettiin selvittämään, onko koululla riittävän suurta tasajännitelähdettä aurinkoinvertterille sekä, mistä saataisiin aurinkoinvertterille sopivat liitäntäkaapelit. Lisäksi mietittiin aurinkoinvertterin asennusmahdollisuuksia.

Taulukko 2. PVS300 aurinkoinvertterin toiminta- ja raja-arvoja

	PVS300	3 300 W - 2
Input (DC)	Nimellinen aurinkopaneelin teho	3 400 W
	Max aurinkopaneelin teho	3 700 W
	Käyttöjännitealue, MPPT	335 - 800 V
	Max aurinkopaneelin tuottama jännite	900 V
	Nimellinen käyttöjännite	480 V
	Laitteen heräämisjännite	250 V
	Verkkoon syötön kynnysjännite	370 V
	Max virta	10,5 A
	Max takaisin syöttövirta	25,4 A
Output (AC)	Nimellisteho	3 300 W
	Nimellisvirta	14,3 A
	Max virta	15,6 A
	Jännitteen toiminta-alue	180 - 276 V
	Taajuuden toiminta-alue	47 - 63 Hz
	Nimellinen verkkoliitäntä	1/N/PE, AC 230 V, 50/60 Hz

4.3 Kytkennän suunnittelu ja valmistelu

Sopivat liitäntäkaapelit saatiin tilattua Internetistä. Kaapelit ja liitäntäosat tulivat irrallisina, joten ne jouduttiin rakentamaan ABB:n PVS300 manuaalin mukaisesti. Kun liitäntäkaapelit saatiin valmiiksi, selvitettiin, minkälaisia jännitelähteitä koululla on. Aurinkoinvertteri vaatii toimiakseen lähes 400 V:n tasajännitteen, joten koululla oli kaksi vaihtoehtoa jännitelähteeksi:

- 1) 3-vaiheinen vaihtojännitelähde, josta saatu vaihtojännite muutetaan kuusipulssisuuntaajan kautta tasajännitteeksi. Kuusipulssisuuntaajalta saadaan maksimissaan 550 V:n tasajännite ja 20 A:n virta.
- 2) Laboratorion työpöydän tasajännitelähteestä saadaan maksimissaan 350 V:n jännite ja 6 A:n virta.

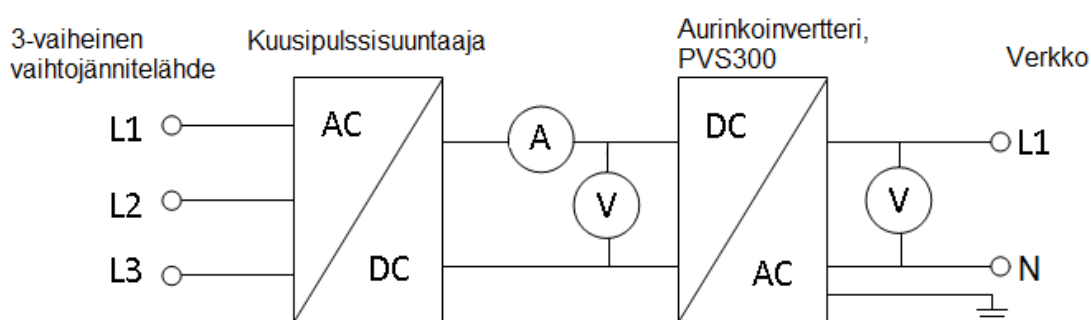
Kahdesta vaihtoehdosta valittiin 3-vaiheinen vaihtojännitelähteen ja kuusipulssisuuntaajan yhdistelmä, koska laboratorion työpöydän 350 V:n tasajännite ei riittänyt saamaan aurinkoinvertteriä syöttämään verkkoon virtaa. Verkkoon syötön kynnsjännite on PVS300:lla 370 V (ks. taulukko 2).

Asennusmahdollisuuksia mietittäessä tuli muutama vaihtoehto esille. Laite voitaisiin kiinnittää liikuteltavaan kääryyn, kiinnittää suoraan seinään tai jättää kokonaan kiinnittämättä, koska laite oli suhteellisen helposti liikuteltava. Eniten kannatusta näistä sai liikuteltavaan kääryyn kiinnitys. Laite jätettiin kuitenkin kiinnittämättä tutkimuksen ajaksi, jotta nähtäisiin saadaanko laitteesta edes laboratoriotyötä.

4.4 Kytkenän toteutus

4.4.1 Ensimmäinen kytkentä

Ensimmäinen kytkentä toteutettiin 3-vaiheisella vaihtojännitelähteellä, kuusipulssisuuntaajalla ja aurinkoinvertterillä (ks. kuva 15). Lisäksi kytkennässä oli jännite- ja virtamittareita, joiden avulla pystyttiin tarkkailemaan jännitteiden ja virtojen arvoja. Mittauskytkennällä hahmoteltiin aurinkosähköjärjestelmää. 3-vaiheinen vaihtojännitelähde yhdesä kuusipulssisuuntaajan kanssa vastasi kytkennässä auringolta saatavaa energiaa ja aurinkokennoja.



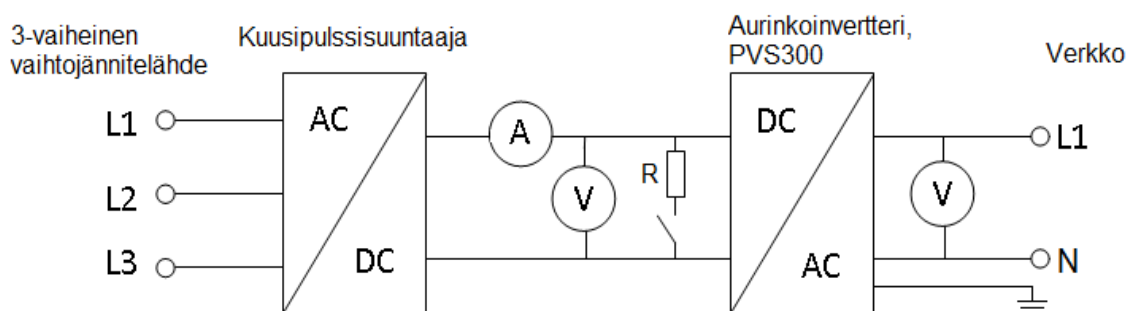
Kuva 15. Ensimmäinen kytkentäversio

Ensimmäisellä kytkennällä saatiin aurinkoinvertteri käynnistymään lepotilaan. Lepotilassa se ei vielä syötä virtaa verkkoon. Aurinkoinvertterille kuitenkin syötettiin yli 400 V:n tasajännitettä, jolloin sen olisi pitänyt syöttää virtaa verkkoon. Näin ei kuitenkaan

käynyt. Ongelmaa pohdittiin yhdessä ABB:lta tulleen henkilön kanssa. Aluksi oletettiin, että aurinkoinvertterin maa-asetukset ovat väärin tai se on kokonaan rikki. Tultiin kuitenkin siihen tulokseen, että maa-asetukset ovat kunnossa, mutta muutama sulake oli palanut. Sulakkeet vaihdettiin, ja kokeiltiin uudestaan. Aurinkoinvertteri ei vielääkään alkanut syöttämään virtaa verkkoon, ja muutama sulake oli jälleen palanut. Sitten tajuttiin, että käynnistäessä laitteistoa kuusipulssisuuntaajalta tuleva virtapiikki on liian suuri PVS300:n 12 V:n sulakkeille. Vika korjattiin toiseen kytkentäversioon.

4.4.2 Toinen kytkentä

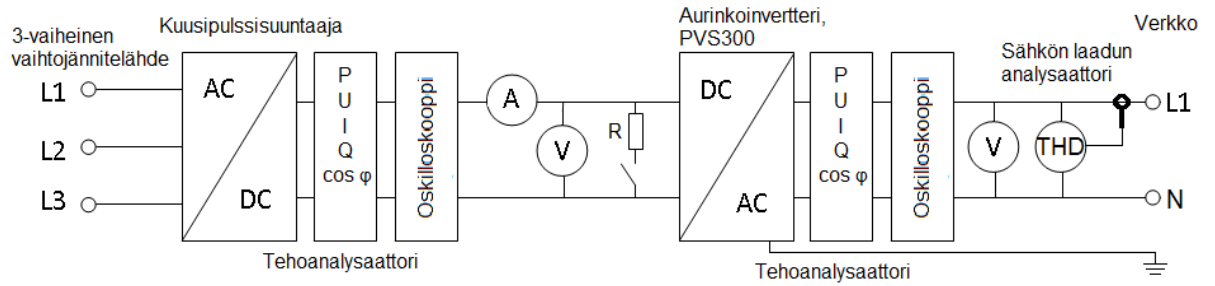
Toinen versio kytkennästä (ks. kuva 16) oli muuten samanlainen kuin ensimmäinen versio, mutta siihen lisättiin 100 ohmin säädettävä vastus ja 0/1 -kytkin. Ne kytkettiin kuusipulssisuuntaajan kanssa rinnan, ja toistensa kanssa sarjaan. Kuusipulssisuuntaajalta tuleva virtapiikki ohjattiin vastukseen, jolla vältettiin aurinkoinvertterin sulakkeiden palaminen. Vastuksen ja kytkimen lisäämisen jälkeen saatiin aurinkoinvertteri syöttämään virtaa verkkoon.



Kuva 16. Toinen kytkentäversio

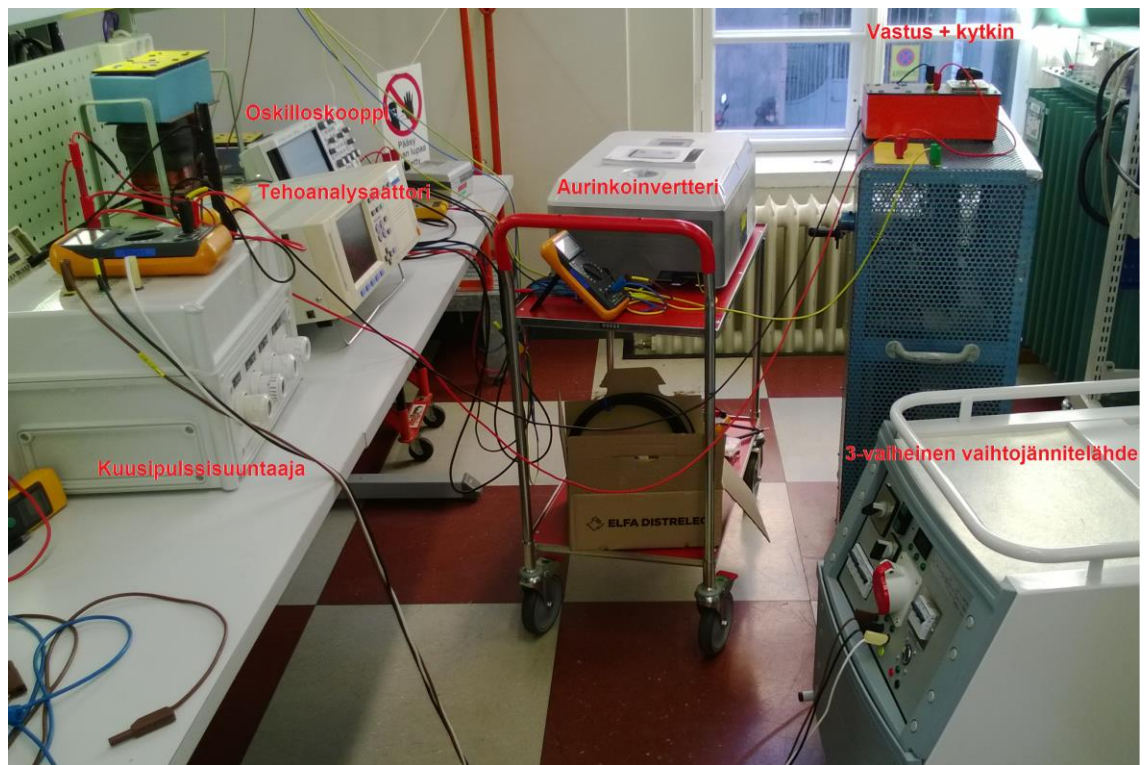
4.4.3 Kolmas kytkentä

Kolmas versio kytkennästä (ks. kuva 17 s. 22) oli lopullinen mittauskytkentä. Kolmannen kytkentään lisättiin mittauslaitteet, joita olivat tehoanalysaattori, oskilloskooppi ja sähkönlaadun analysaattori. Tehoanalysaattorilla pystyttiin mittaamaan samat suureet kuin jännite- ja virtamittarilla. Jännite- ja virtamittarit kuitenkin pidettiin kytkennässä, koska niistä oli helppo seurata sekä virran että jännitteen arvoja ja niiden muutoksia.



Kuva 17. Kolmas kytkentäversio, joka oli lopullinen mittauskytkentä

Kuvassa 18 esitetään sama mittauskytkentä laboratoriossa toteutettuna, mikä on esitetty kuvan 17 piirretyssä versiossa. Kuvasta 18 puuttuu ainoastaan kuvan 17 mittauskytkennässä esiintyvä sähkölaadun analysaattori. Oskilloskoopin yläpuolella olevat johdot ovat kytkettynä verkkoon, joka ei kuvassa 18 näy.



Kuva 18. Mittauskytkentä laboratorio olosuhteissa

4.5 Laitteiston käynnistys

Laitteistoa käynnistettäessä 0/1 -kytkimen pitää olla 1 asennossa, jotta kuusipulssisuuntaajalta tuleva virtapiikki saadaan ohjattua vastukselle. Kytkin voidaan laittaa 0 asentoon eli vastus irrottaa kytkennästä muutaman minuutin päästä käynnistyksestä, kun aurinkoinvertterin kondensaattorit ovat latautuneet.

Aurinkoinvertteri käynnistyy lepotilaan, kun tasajännitettä syötetään noin 250 V. Jotta aurinkoinvertteri syöttäisi virtaa verkkoon, täytyy tasajännitettä syöttää noin 400 V ja aurinkoinvertterin pitää olla kytkettynä verkkoon. Lisäksi aurinkoinvertterin asetuksista, joihin normaalilla käyttäjällä ei ole mahdollisuutta päästä, pitää salaista polkua pitkin *inverter enable* -kohdasta vaihtaa nolla ykköseksi. Aurinkoinvertterin heräämisjännite ja verkkoon syötön kynnysjännite nähtiin taulukosta 2.

5 Mittausjärjestelyn toteutus

5.1 Mittauksen suorittaminen

Mittaukset suoritettiin tehoanalysaattorilla, oskilloskoopilla ja sähkölaadun analysaattorilla. Tehoanalysaattorilla mitattiin kuusipulssisuuntaajan ja aurinkoinvertterin välistä sekä aurinkoinvertterin ja verkon välistä. Mittaukset suoritettiin kolmella eri kuormalla, jotka olivat 10 %, 50 % ja 80 % maksimista. Kuormaa pystyttiin muuttamaan aurinkoinvertteristä. Kuormalla tarkoitetaan tässä tapauksessa, sitä kuinka suurta osuutta maksimista aurinkoinvertteri syöttää verkkoon. Tehoanalysaattorilla saatiin mitattua teho, jännite, virta ja $\cos \varphi$. Mittausten perusteella voitiin laskea hyötysuhde seuraavalla kaavalla:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}, \quad (1)$$

missä P_1 on tasajännitealueelta mitattu teho ja P_2 on vaihtojännitealueelta mitattu teho.

Oskilloskoopilla otettiin virran ja jännitteen käyrämuotoja samoista kohdista, joista tehoanalysaattorilla tehtiin mittaukset. Kuvia otettiin jokaisella eri kuormalla. Lisäksi oskilloskoopilta otettiin jokaisen käyrän datat numeromuodossa talteen, jotta voitiin vertailun

vuoksi laskea hyötysuhteet myös näillä arvoilla. Oskilloskoopin numerodata muodostui jokaisen käyrän mittauspisteistä, joita oli 2000 kappaletta 10 mikrosekunnin välein per käyrä. Näistä arvoista laskettiin Microsoft Officen Excel-ohjelmalla tasa- ja vaihtojännitteen tehot mittauspisteiden arvojen keskiarvona. Hyötysuhteet saatiin laskettua kaavalla 1.

Sähkönlaadun analyysointilaiteella saatiin mitattua virralle ja jännitteelle yliaallot sekä harmoninen kokonaissärö. Mittaukset suoritettiin 10 %, 50 % ja 80 % kuormalla maksimista. Arvot mitattiin vain aurinkoinvertterin ja verkon välistä. Tehoanalyysointilaiteella mitattujen arvojen lisäksi jännitteiden, virtojen ja tehojen arvoja otettiin ylös jokaiselta erilliseltä mittarilta sekä aurinkoinvertterin omalta sisäiseltä mittarilta. Näin saatiin varmuus siitä, että laitteet näyttivät kutakuinkin oikeita arvoja.

5.2 Tehoanalyysointilaite ja oskilloskoopin mittaustulosten tarkastelu

Taulukosta 3 voidaan nähdä aurinkoinvertterin sisäisen mittarin antamia arvoja tasa- ja vaihtojännite puolelle sekä verkkoon menevälle teholle, eli tässä työssä niin sanotulle kuormalle.

Taulukko 3. Aurinkoinvertterin sisäiseltä mittarilta mitatut arvot

	U(AC)/V	U(DC)/V	P(AC)/kW
Kuorma min / 10 %	234,3	433,2	0,462
Kuorma / 50 %	241,2	411,8	2,375
Kuorma max / 80 %	246,2	403,7	3,811

Mittaustuloksia otettiin myös erillisiltä digitaalimittareilta ja analogisilta mittareilta (ks. taulukko 4 seur. s.). Digitaalimittareilla mitattiin tasajännitettä ja vaihtojännitettä kahdesta syystä. Ensinnäkin jotta voitiin havainnoida mahdolliset nopeat jännitemuutokset, ja toiseksi jotta pystyttiin vertailemaan eri mittareiden antamia tuloksia ja niiden paikkaansa pitävyyttä. Analogisella mittarilla mitattiin tasavirtaa, koska sillä oli helppo ja nopea havaita äkillisiä virran muutoksia.

Taulukko 4. Erillisillä mittareilla mitattuja arvoja

	U(AC)/V	U(DC)/V	I(DC)/A
Kuorma min / 10 %	235,4	431,3	0,9
Kuorma / 50 %	242,4	410,6	6,6
Kuorma max / 80 %	248,5	403,2	10,2

Mittaustuloksia otettiin muistiin mahdollisimman monelta eri mittarilta, jotta voitiin saada varmuus laitteiden toimivuudesta. Kuusipulssisuuntaajan ja aurinkoinvertterin välistä mitatut mittaustulokset nähdään taulukosta 5. Kyseisestä välistä mitatut arvot mitattiin tasajännitealueelta.

Taulukko 5. Kuusipulssisuuntaajan ja aurinkoinvertterin välistä mitatut mittaustulokset

	U/V	I/A	P/kW	cos φ
Kuorma min / 10 %	428,87	1,112	0,479	1,00
Kuorma / 50 %	407,85	5,795	2,378	1,00
Kuorma max / 80 %	400,75	9,483	3,813	1,00

Aurinkoinvertterin ja verkon välistä mitatut mittaustulokset voidaan nähdä taulukosta 6. Aurinkoinvertterin jälkeen jännitealue oli vaihtojännitettä, joten taulukoiden 5 ja 6 tulokset ovat vertailukelpoisia ainoastaan tehon osalta. Tehojen suhteena saatiin laskettua hyötysuhde kaavan 1 mukaisesti.

Taulukko 6. Aurinkoinvertterin ja verkon välistä mitatut mittaustulokset

	U/V	I/A	P/kW	cos φ
Kuorma min / 10 %	234,30	1,958	0,4492	0,9738
Kuorma / 50 %	240,72	9,544	2,2941	0,9978
Kuorma max / 80 %	246,81	14,892	3,6720	0,9997

Oskilloskoopin mittaustuloksien perusteella saatiin Excel-ohjelmalla laskettua tehojen arvot tasa- ja vaihtojännite puolelle, jotka nähdään taulukosta 7. Taulukon tehojen avulla saatiin kaavaa 1 käyttäen laskettua hyötysuhde.

Taulukko 7. Oskilloskoopin mittaustuloksilla lasketut tehojen arvot

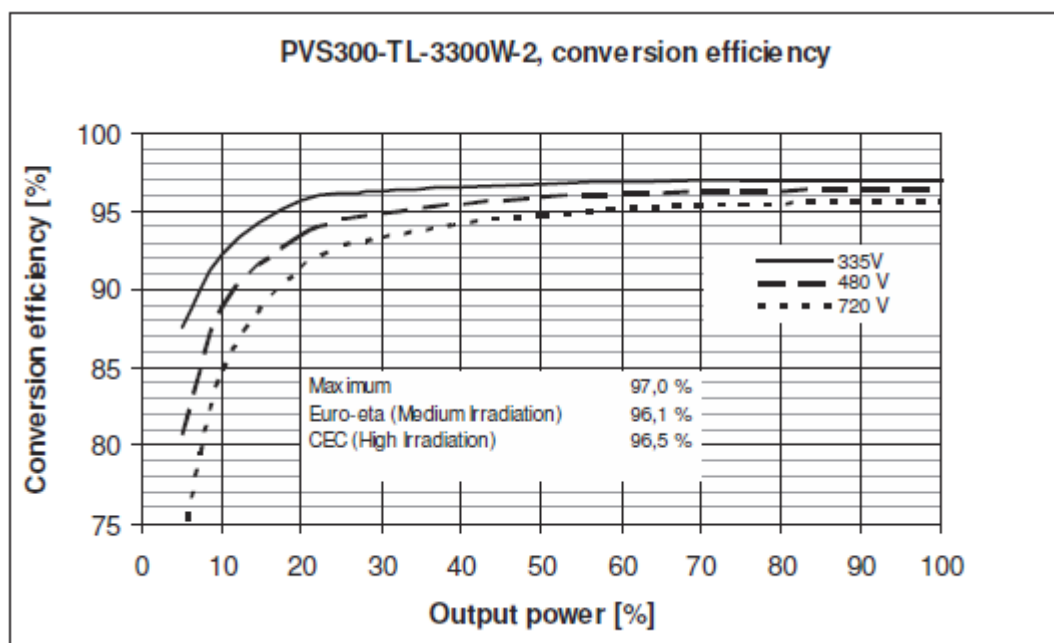
P(AC)/kW	P(DC)/kW
0,425	0,534
2,175	2,372
3,486	3,807

Taulukosta 8 (ks. s. 26) nähdään tehoanalysaattorin mittaustuloksilla sekä oskilloskoopin numerodatalla lasketut hyötysuhteet jokaiselle eri kuormalle. Tehoanalysaattorin mittaustuloksilla laskettuna, kaavaa 1 käyttäen, saadut hyötysuhteet olivat todella hyviä jopa pienellä kuormalla. Vastaavasti oskilloskoopin arvojen perusteella lasketut hyötysuhteet olivat hieman pienempiä kuin tehoanalysaattorin mittaustuloksilla lasketut. Poikkeuksena pienin kuorma, jolla hyötysuhde on huomattavasti pienempi.

Taulukko 8. Tehoanalysaattorin ja oskilloskoopin mittausarvoilla lasketut hyötysuhteet

	Tehoanalysaattori	Oskilloskooppi
	η / %	η / %
Kuorma min / 10 %	93,8	79,6
Kuorma / 50 %	96,5	91,7
Kuorma max / 80 %	96,3	91,6

Kummallakaan mittaustavalla saadut hyötysuhteet eivät täysin vastaa ABB:n manuaalin antamia hyötysuhdearvoja (ks. kuva 19). Tämä tosin johtuu siitä, että tutkimuksessa tehdyt mittaukset ovat tehty diodisillalla tasasuunnatulla tasasähköllä, joka ei vastaa aurinkopaneeleilla tuotettua tasasähköä. Mittauksissa jännitteenä käytettiin reilua 400 V, joten hyötysuhteita kannattaa verrata kuvan 19 kaaviosta keskimmäiseen käyrään eli katkoviivaan tai hieman sen alapuolelle.



Kuva 19. Tutkimuksessa käytetyn aurinkoinvertterin hyötysuhdekaavio [26.]

Tehoanalysaattorin mittaustuloksilla lasketut hyötysuhteet 50 %:n ja 80 %:n kuormilla vastaavat hyvin ABB:n antamia hyötysuhdearvoja. 10 %:n kuormalla hyötysuhde on hieman liian korkea. Oskilloskoopin mittausarvoilla mitatut hyötysuhteet ovat ABB:n antamiin hyötysuhteisiin verrattuna selvästi liian matalia. Mittauksia tehdessä oskilloskoopilla mitatut ja lasketut arvot vaikuttivat realistisemmilta. Kuitenkin kun arvoja vertailtiin ABB:n antamiin hyötysuhdearvoihin, tehoanalysaattorin arvot alkoivat tuntua luotettavammilta.

Tehoanalysaattorin mittaustuloksilla lasketuista hyötysuhteista ihmetystä kuitenkin herätti pienimmällä kuormalla laskettu hyötysuhdearvo, joka oli yllättävän hyvä. Aluksi oletettiin, että tehoanalysaattori antaisi virheellisiä virran tai jännitteen arvoja. Muiden hyötysuhdearvojen ollessa kuitenkin todella täsmällisiä ABB:n antamien arvojen kanssa, jäi hieman epäselväksi, miksi pienimmällä kuormalla hyötysuhde oli niin hyvä tehdyissä mittauksissa. Tämä voidaan kuitenkin selittää sillä, että tutkimuksessa käytettiin diodisillalla tasasuunnattua tasasähköä, joka ei vastaa aurinkopaneeleilla tuotettua tasasähköä.

Mittauksien käyrämuodoista voidaan havaita muun muassa aurinkoinvertterin ominaisuus muokata vaihtovirta- ja vaihtojännitekäyrä todella puhtaaksi sinikäyriksi (ks. liite 1). Pienellä kuormalla vaihtovirtakäyrässä on vielä pieniä säröjä, mutta mitä suuremmaksi kuorma kasvaa, sitä puhtaammaksi käyrä muuttuu. Lisäksi ihmetystä saattaa aiheuttaa tasavirtakäyrän muoto. Muoto aiheutuu siitä, että mittauskytkennässä vaihtojännite muutetaan tasajännitteeksi kuusipulssisuuntaajan avulla. Liitteessä 1 on myös taulukko oskilloskooppikuvien käyrien värikoodeista.

5.3 Sähkönlaadun analysaattorin mittaustulosten tarkastelu

5.3.1 Jännitteen ja virran harmoniset kokonaissäröt

THD (Total Harmonic Distortion) eli harmoninen kokonaissärö ilmaisee puhtaaseen siniaaltoon syntyneiden harmonisten kerrannaisten voimakkuutta suhteessa perustajuksen aallon voimakkuuteen. Eli, kuinka paljon kaikki yliaaltokomponentit vaikuttavat aaltomuodon säröön. THD ilmaistaan perustajuksen aallon prosenttiosuutena. [27, s. 29.]

Taulukko 9. Jännitteen ja virran harmonisten kokonaissäröjen mittaustulokset

	THD/U	U/V	THD/I	I/A
Kuorma min / 10 %	2,3 %	235,2	9,5 %	1,92
Kuorma / 50 %	2,0 %	243,7	1,8 %	9,43
Kuorma max / 80 %	2,4 %	248,7	1,1 %	14,84

Taulukon 9 jännitteen harmonisista kokonaissäröistä voidaan havaita, että yliaaltokomponenttien vaikutus aurinkoinvertterin jännitteeseen on hyvin pieni. Aurinkoinvertterin tuottaman jännitteen käyrämuoto on hyvin lähellä puhdasta siniaaltoa. Virran harmonisista kokonaissäröistä (ks. taulukko 9) voidaan huomata, että pienellä kuormalla särö on suhteellisen suuri. Mitä enemmän kuormaa lisätään, sitä pienemmäksi särö laskee. 10 %:n kuormalla säröllä on vielä vaikutusta aaltomuotoon, mutta jo 50 %:n kuormalla särö on laskenut lähes olemattomaksi.

ABB:n PVS300-aurinkoinvertterin manuaalin mukaan virran särön pitää olla pienempi kuin 3 %. Virran särö 10 %:lla ylittää vaaditun rajan, kuten taulukosta 9 havaitaan. Saatun tulokseen vaikuttaa todennäköisesti se, että aurinkoinvertteriä käytettiin todella pienellä kuormalla. Lisäksi säröä lisää se, että syöttö tuli kuusipulssisuuntaajalta, jonka käyrämuoto ei vastaa aurinkopaneelilta tulevaa käyrämuotoa.

5.3.2 Jännitteen ja virran yliaallot

Yliaallot ovat useimmiten 50 Hz:n perusaallon eli verkkotaajuuden kokonaisia monikerroja. Yliaaltojen vaikutus näkyy siinä, että aaltomuoto ei ole enää puhtaan sinimuotoista. Mitä suurempi on virran käyrämuodon ero puhtaaseen sinimuotoiseen aaltomuotoon, sitä enemmän siinä on yliaaltoja. Yliaaltojen haittavaikutuksia ovat muun muassa laitteiden lämpeneminen ja se, että yliaaltoherkät laitteet voivat toimia virheellisesti. [28.]

Taulukko 10. Minimi kuorman (10 %) yliaallot ja niiden arvot

Yliaalto	U/V	I/A
3	0,0	0,08
5	2,3	0,01
7	3,9	0,12
9	2,0	0,06

Taulukossa 10 voitiin nähdä minimi kuormalla (10 % maksimista) muodostuneet jännitteen ja virran yliaallot, jotka olivat todella vähäisiä. Vain muutamalla jännitteen yliaallolla on hieman merkitystä. Näitä ovat viides, seitsemäs, ja yhdeksäs yliaalto. Muut jännitteen yliaallot ovat todella mitättömiä. Virran yliaalloista merkitystä on kolmannella, seitsemännellä ja yhdeksännellä yliaallolla, mutta niilläkin todella vähäinen. Suurin jännitteen ja virran särö oli seitsemännellä yliaallolla.

Taulukko 11. Puolikkaan kuorman (50 %) yliaallot ja niiden arvot

Yliaalto	U/V	I/A
3	0,0	0,06
5	2,0	0,02
7	3,5	0,11
9	2,1	0,07

Puolikkaalla kuormalla (50 % maksimista) virran ja jännitteen merkitykselliset yliaallot olivat täysin samat kuin minimi kuormalla. Yliaaltojen jännitteiden ja virtojen arvot pysyivät samana tai jopa hieman laskivat verkkoon syötettävän jännitteen ja virran nousussa. Suhteessa siis jännitteen ja virran säröt vähenivät. Taulukosta 11 nähtiin, että suurimmat jännitteen ja virran säröt olivat myös puolella kuormalla seitsemännellä yliaallolla.

Taulukko 12. Maksimi kuorman (80 %) yliaallot ja niiden arvot

Yliaalto	U/V	I/A
3	1,4	0,04
5	2,5	0,00
7	4,7	0,14
9	2,3	0,03

Mittauksien maksimi kuorma oli 80 % maksimista. Kyseisellä kuormalla seitsemäs yliaalto oli edelleen suurin (ks. taulukko 12 seur. s.). Pieniä muutoksia voidaan havaita jännitteen ja virran arvoissa muihin kuormiin nähden, mutta vaikutukset ovat lähes olemattomia. Suurimman yliaallon säröt prosentuaalisesti maksimi jännitteeseen nähden olivat 1,4 - 1,9 % välistä, kuten taulukosta 13 nähdään. Virralla arvoissa oli enemmän heittoa. Pienellä kuormalla virran särö oli prosentuaalisesti reilu 6 %, mutta kahdella suuremmalla kuormalla prosentuaalinen särö oli vain 1 %:n luokkaa.

Taulukko 13. Suurimman yliaallon säröt prosentuaalisesti maksimiin nähden

	Yliaalto	Jännite/ %	Virta/ %
Kuorma min / 10 %	7	1,65	6,26
Kuorma / 50 %	7	1,43	1,18
Kuorma max / 80 %	7	1,87	0,96

6 Mittausjärjestelyn lopputulos ja jatkotoimet

6.1 Lopputulos

Työn lopputuloksena saatiin selvyys PVS300-aurinkoinvertterin mahdollisuuksista laboratoriotyönä. Työtä voidaan pitää onnistuneena, vaikka tästä tehdystä työstä ei suoraan saadakaan laboratoriotyötä. Aurinkoinvertterillä on mahdollista toteuttaa laboratoriotyö, mutta työssä toteutetuilla mittauksilla se ei vielä onnistu. Työ ei ole riittävän laaja laboratoriotyöksi eikä koulun teholähteellä pystytä simuloimaan aurinkopaneeleilta saapuvaa jännitettä tarpeeksi realistisesti. Joidenkin lisäinvestointien ja -suunnittelun avulla aurinkoinvertteristä voidaan kuitenkin modifioida todella hyvä laboratoriotyö. Opetuslaitteena aurinkoinvertteri toimii jo sellaisenaan. Onhan kyseessä kuitenkin nykytekniikka sekä todella mielenkiintoinen ja ajankohtainen laite.

6.2 Jatkotoimet

PVS300-aurinkoinvertterin modifiointia laboratoriotyöksi on helppo jatkaa nyt, kun toimiva mittauskytkentä on jo selvillä ja mittauksia on suoritettu. Lisäksi muutamia mahdollisia kehitysideoita on mietitty. Muun muassa uuden teholähteen hankinta, minkä avulla voidaan simuloida aurinkopaneeleita huomattavasti paremmin kuin nykyisillä laitteilla.

Aurinkoinvertterille pitäisi suunnitella ja keksiä lisää mitattavia asioita, kuten lämpeneminen. Myös aurinkoinvertterin asentaminen liikuteltavaan kärryyn olisi hyvä toteuttaa. Näitä ideoita ja lisäsuunnittelua voisi toteuttaa jatkossa esimerkiksi innovaatioprojek-teissa tai insinööritöissä riippuen siitä aiotaanko aurinkoinvertteriä käyttää koulun laboratoriotöissä tai opetuskäytössä.

Myös aurinkosähköjärjestelmän hankinnan koululle voisi laittaa harkintaan. Sen avulla voitaisiin tarkastella aurinkosähköjärjestelmiä ja aurinkoinvertteriä oikeissa tarkoituksissaan. Aurinkosähköjärjestelmän hankinta ja rakennusprojekti koululle on jo huomattavasti isompi investointi, joten siihen vaaditaan jo kunnan rahoitusta.

7 Yhteenveto

Tämän insinöörityön tarkoituksena oli tutkia, voidaanko PVS300-aurinkoinvertteristä modifioida opetuskäyttöön soveltuva opetuslaite ja laboratoriotyö. Lisäksi perehdyttiin hyvän laboratoriotyön vaatimuksiin. Työssä on esitelty mittauskytkennän muodostuminen suunnitteluvaiheesta toteutusvaiheeseen ja lopulta mittausten teko vaiheeseen asti.

Työn teoriaosuudessa perehdytään nykypäivänä suurella vauhdilla kasvavan energiamuodon eli aurinkoenergian erilaisiin sähkötuottojärjestelmiin. Työssä myös selvitetään, minkälaisia aurinkosähköjärjestelmiä on olemassa ja, mitä komponentteja aurinkosähköjärjestelmät tarvitsevat. Lisäksi tarkastellaan myös tarkemmin tutkimuksessa-kin käytetyn aurinkoinvertterin sisältöä.

Tutkimuksessa perehdytään perusteellisesti aurinkoinverttereihin ja niiden toimintaan. Tutkimuksen avulla saadaan myös selvä tieto aurinkoinvertterin soveltuvuudesta opetuskäyttöön ja laboratoriotyöksi. Lisäksi mietitään mahdollisia lisätutkimus mahdollisuuksia.

Työn tekeminen oli mielenkiintoinen ja opettavainen projekti. Työtä tehdessä täytyi kommunikoida paljon eri tahojen kanssa. Koko ajan oltiin tekemisissä ajankohtaisen nykYTEKNIKAN laitteen parissa, mikä teki tutkimuksesta todella mielenkiintoisen. Aurinkoenergia on kuitenkin nopeasti yleistynyt energiamuoto maailmalla. Lisäksi työ opetti teorioiden soveltamista käytännön asioihin.

Lähteet

- 1 Kvik, Pasi. 2010. Verkkoon kytketty aurinkopaneelijärjestelmä. Insinööritö. Ammattikorkeakoulu. Verkkodokumentti.
<https://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/20683/Kvik_Pasi.pdf?sequence=1>. Luettu 18.9.2013.
- 2 Aurinkoenergia. Aurinkokennot.fi. Verkkodokumentti.
<<http://www.aurinkokennot.fi/miten-aurinkosahkoa-tuotetaan/>>. Luettu 18.9.2013.
- 3 Aurinkosähkö. 2011. Pistoke Oy. Verkkodokumentti.
<<http://www.pistoke.fi/aurinkosahko/aurinkosahko>>. Luettu 18.9.2013.
- 4 Salin, Markus. 2011. Aurinkosähköjärjestelmän ja hybridi-ilmanvaihtojärjestelmän toiminta ja energiatehokkuusselvitys opetusrakennuksessa. Insinööritö.
<<http://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/27957/SalinMarkus%2030042011.pdf?sequence=1>>. Luettu 20.9.2013.
- 5 Aurinkosähköjärjestelmät. 2013. Aurinkopaneelit.net. Verkkodokumentti.
<<http://www.aurinkopaneelit.net/aurinkosahkojarjestelmat>>. Luettu 17.9.2013.
- 6 Aurinkokennojen toimintaperiaate. 2010. Suntekno. Verkkodokumentti.
<<http://suntekno.bonsait.fi/resources/public/tietopankki/paneelit.pdf>>. Luettu 1.10.2013.
- 7 Steca PR 10 - 30. Steca. Verkkodokumentti.
<http://www.steca.com/index.php?Steca_PR_10_30_en>. Luettu 27.9.2013.
- 8 Saarensilta, Jukka. 2012. Aurinkosähkön hyödyntäminen: Teknisten ratkaisujen kartoitus. Insinööritö.
<<http://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/53374/Aurinkos.pdf?sequence=1>>. Luettu 25.9.2013.
- 9 Batteries and Charge Control in Stand-Alone Photovoltaic Systems. 1997. Verkkodokumentti.
<<http://www.localenergy.org/pdfs/Document%20Library/Fundamentals%20of%20batteries%20and%20charge%20control.pdf>>. Luettu 25.9.2013.
- 10 Industry Guide: Inverter and PV System Technology. 2012. Verkkodokumentti.
<http://www.pv-system-tech.com/fileadmin/user_upload/material2012/InSyst2012_Screen.pdf>. Luettu 25.9.2013.
- 11 Erat Bruno. 2008. Aurinko-opas; Aurinkoenergiaa rakennuksiin. Porvoo: Kustantaja Painoyhtymä Oy. Luettu 2.10.2013.

- 12 Lataussäätimet. 2012. Akkupojat. Verkkodokumentti.
<<http://www.akkupojat.fi/index.php/site/aurinkopaneelit/lataussaeatimet>>. Luettu 3.10.2013.
- 13 Akut. 2012. Akkupojat. Verkkodokumentti.
<<http://www.akkupojat.fi/index.php/site/aurinkopaneelit/akut-3>>. Luettu 27.9.2013.
- 14 Paavola Minna. 2012. Verkkoön kytkettyjen aurinkosähköjärjestelmien potentiaali Tampereella. Diplomityö.
<http://www.hermiagroup.fi/@Bin/1425839/Diplomityo_Paavola_painettuversio.pdf>. Luettu 9.10.2013.
- 15 Berman Mel. 2008. All about EMI filters. Verkkodokumentti. <http://us.tdk-lambda.com/ftp/other/all_about_emi_epmag.pdf>. Luettu 17.10.2013.
- 16 Hämäläinen Toni. 2010. Vaihtosähkösuodatus invertterin lähdössä. Opinnäyte-työ.
<http://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/12802/Hamalainen_Toni.pdf?sequence=1>. Luettu 19.10.2013.
- 17 Liserre Marco, Blaabjerg Frede and Hansen Steffan. 2005. Design and Control of an LCL-Filter-Based Three-Phased Active Rectifier. Verkkodokumentti.
<<http://faculty.mu.edu.sa/public/uploads/1338183924.2236design%20and%20control%20of%20an%20lcl%20filter%20based%20three%20phase%20active%20rectifier.pdf>>. Luettu 18.10.2013.
- 18 Laiti Petteri. 2010. Taajuusmuuttajaan perustuva voimatuotannon liittäminen heikkoon sähköverkkoon. Insinöörityö.
<http://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/15437/Inssityo_Petteri_Laiti_Metropolia.pdf?sequence=1>. Luettu 19.10.2013.
- 19 Pokkinen Olli. 2011. Tuulivoimakäytön laboratoriotestausjärjestelmä. Diplomityö.
<http://webhotel2.tut.fi/units/set/opetus/pdf%20julkiset%20dyot/Pokkinen_Olli_julk.pdf>. Luettu 19.10.2013.
- 20 Hannonen Janne. 2011. Aurinkopaneeleihin liitettävien vaihtosuuntaajien testaussuunnitelman laadinta ja toteutus. Diplomityö.
<<http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/69565/nbnfi-fe201105051505.pdf?sequence=3>>. Luettu 18.10.2013.
- 21 Mattila Martti. 2008. Lämpötilan vaihteluiden vaikutukset vaihtosuuntaajan IGBT-moduuliin. Diplomityö. <<http://lib.tkk.fi/Dipl/2008/urn012395.pdf>>. Luettu 18.10.2013.

- 22 Mattsson Aleks. 2012. Tasasähköverkon modulaarisen vaihtosuuntaajan rakenne- ja kustannusanalyysi. Diplomityö.
<http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/77560/LVDC_Mattsson.pdf?sequence=1>. Luettu 16.10.2013.
- 23 Cullen Richard A. What is Maximum Power Point Tracking (MTTP) and How Does it Work. Verkkodokumentti.
<http://www.blueskyenergyinc.com/uploads/pdf/BSE_What_is_MPPT.pdf>. Luettu 14.10.2013
- 24 Schneider Tom. 2009. Aurinkosähköjärjestelmien tuottaman tasavirran käyttö toimistorakennuksen LED-valaistusjärjestelmissä. Diplomityö.
<<https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/3139/urn100106.pdf?sequence=1>>. Luettu 15.10.2013
- 25 Kupila Eero. Lehtori, Metropolia Ammattikorkeakoulu, Helsinki. Haastattelu 22.11.2013.
- 26 Product manual: PVS300 string inverters. ABB Solar Inverters. Verkkodokumentti.
<[http://www05.abb.com/global/scot/scot232.nsf/veritydisplay/467803e56ed62e1ec1257b94002ba8e0/\\$file/EN_PVS300_Product_Manual_B_screen.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot232.nsf/veritydisplay/467803e56ed62e1ec1257b94002ba8e0/$file/EN_PVS300_Product_Manual_B_screen.pdf)>. Luettu 15.9.2013.
- 27 Zaitseva Katerina. 2012. Aurinkosähköjärjestelmien, elektronisesti kommutoitujen tasavirta moottoreiden ja LED-valaistuksen käytön vaikutus rakennusten sähkön laatuun. Diplomityö. <<http://lib.tkk.fi/Dipl/2012/urn100628.pdf>>. Luettu 11.12.2013.
- 28 Yliaallot taajuusmuuttajakäytössä. ABB. Verkkodokumentti.
<<http://www.pkky.fi/Resource.phx/pkky/projektit/taitaja-osaaminen/sahko.htx.i2026.pdf>>. Luettu 13.12.2013.

Virran ja jännitteen käyrämuodot

Oskilloskoopilla mitatut virran ja jännitteen käyrämuodot kaikilla kolmella kuormalla (10 %, 50 % ja 80 %). Ensimmäisellä sivulla on taulukko värikoodeista ja käyrämuodot 10 %:n teholla maksimista. Toisella sivulla on 50 %:n ja 80 %:n teholla maksimista.

Keltainen	AC jännite
Vihreä	DC jännite
Sininen	AC virta
Punainen	DC virta

